CRDS-FY2019-WR-06

俯瞰ワークショップ報告書

ナノテクノロジー・材料分野　区分別分科会
「光技術の俯瞰～光技術の注目動向と日本の技術力強化の方向性～」

2019年12月23日（月）開催

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

エグゼクティブサマリー

本報告書は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が令和１年 12 月 23 日に開催した『俯瞰ワークショップ（WS） ナノテクノロジー・材料分野 区分別分科会「光技術の俯瞰 ～光技術の注目動向と日本の技術力強化の方向性～」』に関するものである。

CRDS では、ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰報告書を２年毎に発行しており、直近では平成 31 年 3 月に「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野（2019 年）」（CRDS-FY2018-FR-03）を発行した。これに続く 2021 年版の検討に当たり、前回の俯瞰報告書で欠けていた部分、研究動向の変化・進展のきざしから新たに加えるべき部分を考慮して、光技術、プロセス・インフォマティクスの２つの領域の調査を目的にワークショップを開催し、ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰を充実させていく予定である。

光の技術は光通信、自動運転、ディスプレイ、イメージセンサ、LED 照明、太陽電池、レーザー加工、計測・評価装置などの民生用製品や産業用製品に広く使われ、情報処理・通信分野、エネルギー分野だけでなくバイオ・医療の分野への利用も進んできている。今後は、各技術の高度化はもとより、異分野の技術との融合・統合により新たな技術領域や応用分野を作り出していくことが期待される。一方、エレクトロニクス、通信機器、計測装置など以前は日本が先端技術を保有し競争力が強かった産業分野において、最近は産業競争力が低下している。また、今後の成長が見込まれるバイオ・医療などの新領域や、光技術の基盤となるレーザーや検出器などの技術でも、海外の装置に席巻される状況になってきている。このような状況を踏まえ、今後の大きな発展が期待され注目される光技術、世界との競争において日本が強化していくべき技術・応用領域、異分野融合や人材育成も含めた光技術の強化に必要な視点・考え方、それを強力に推進できる研究体制、などについて議論を深める目的で、今回のワークショップを開催した。

ワークショップの趣旨説明では、ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰活動における光技術全体の俯瞰ができていないこと、最近の日本における光技術関連の産業界および学術界の問題点、世界における最近の研究動向、新たな光技術俯瞰図案、などについて示した。

コンピューティング技術に関する話題提供１では、「リザーバーコンピューティングと意思決定への応用」、「ポストムーアとフォトニクス」、「コンピューティング技術を活用した光デバイス設計と展望」に関する最新の成果と研究動向が紹介された。

イメージング・計測技術に関する話題提供２では、「フォトニクスによるソリッドステートライダー開発」、「光の波面・偏光分布制御と光イメージング」、「バイオイメージングとレーザー光源への期待」に関する最新の成果と研究動向が紹介された。

次世代光学素子／新たな光基盤技術に関する話題提供３では、「集積ナノフォトニクス技術の新しい展開」、「メタマテリアル/メタサーフェスの現状と展望」、「量子カスケードデバイスの進展」、「光コムの進展と分光応用」に関する最新の成果と研究動向が紹介された。

総合討論では、CRDS からの趣旨説明、招聘者による話題提供（1～3）、事前アンケートの取り纏め表を基に、以下の(1)～(4)の項目について意見交換を行った。それぞれの主な意見のまとめ、およびそこから導き出した今後の光技術の発展への期待(5)を以下に示す。

(1)注目されている光科学技術、社会・産業上重要な分野、保持しておくべき基盤技術
・日本の中から世界に目を向けることが重要になっており、深刻な地球温暖化、伝染病、水汚染、海洋汚染、大気汚染などへの対応が必要
・人と光との関わりとしてディスプレイや照明、バーチャルリアリティなどエンターテイメントの視点などが重要
・AI／IoT の時代における光のアナログ性を活かしたコンピューティングへの応用、イメージング技術、LiDAR 等のセンサ、メタサーフェスなどが注目
・量子光学、レーザー光源、レーザー加工、レンズなどの基盤技術の維持が必要
(2)日本として強化していくべき分野
・SDGs に関して世界の現場で求められる技術
・光のアナログ性を活用したフォトニックアクセラレータによる情報処理技術の優位性の実証、各種イメージング技術による情報の取得技術、エンターテイメント関連光技術、機能性光材料
・特に、日本の強い材料と光技術との組合せは、環境問題・プラスチック問題などにも関連して戦略的な強化の検討が必要
(3)光の分野で日本が世界に伍していくために必要な体制・仕組み
・日本の持つレーザーなど様々なものづくりのシーズ技術とデジタル技術を組み合わせてアイデアを実現可能とする拠点・仕組みを検討し、これらをまとめてプラットフォームとして世界に発信することが重要
・材料分野や化学分野、医学分野など異分野と光技術の連携を促進するシステム、およびプラットフォームやファブ機能を有する研究拠点が必要
・若い人のアイデアを生かせるように、多様性や高リスクを容認し、裾野を広げる基礎研究ができる体制や環境の整備、および企業と大学間や研究者間を橋渡しするコーディネーターの充実が必要
(4)光技術の俯瞰図
・世界の視点から SDGs への貢献、重力場などの基礎学理への貢献を追加
・光の波面制御、偏光制御、量子光学、医療・バイオで重要となる X 線、電磁波領域での新たな光源、などの項目の追加
(5) 今後の光技術発展への期待
・多様化する社会や顕在化する地球規模の課題をより強く意識し、より広い視点で分野融合・連携を進め、従来想定されないような応用も含めて光技術（光学・フォニクス技術）を活かす新しい方向性を見出すことが必要
・光技術自体についても、硬直化することなく新しい概念や材料を積極的に取り入れる柔軟性が求められ、これらにより基礎科学の深化への貢献を期待
・各研究領域で世界をリードする成果創出の環境提供に加え、俯瞰的で高い視点を有するビジョン創成人材が育つ風土の醸成により、長期的発展を期待

これらの結果は、CRDS でさらに検討を加えて 2020 年度末に発行予定の「研究開発の俯瞰報告書　ナノテクノロジー・材料分野（2021 年）」に反映させるとともに、今後の戦略提言にも活用していく予定である。

目　次

エグゼクティブサマリー

１．趣旨説明　曽根　純一、馬場　寿夫（JST-CRDS）····· 1

２．光技術の最新動向　中野　義昭（東京大学）················· 6

３．コンピューティング技術·· 12

３．１　リザーバーコンピューティングと意思決定への応用
内田　淳史（埼玉大学）················ 12

３．２　ポストムーアとフォトニクス　並木　周（AIST）······················ 21

３．３　コンピューティング技術を活用した光デバイス設計と展望
橋本　俊和（NTT 先端集積デバイス研）··· 27

４．イメージング・計測技術·· 33

４．１　Si フォトニクスによるソリッドステートライダー開発
馬場　俊彦（横浜国立大学）············ 33

４．２　光の波面・偏光分布制御と光イメージング
小澤　祐市（東北大学）················ 41

４．３　バイオイメージングとレーザー光源への期待
小関　泰之（東京大学）················ 48

５．次世代光学素子／新たな光基盤技術······························· 55

５．１　集積ナノフォトニクス技術の新しい展開
納富　雅也（東京工業大学／NTT）······· 55

５．２　メタマテリアル・メタサーフェスの現状と展望
高原　淳一（大阪大学）················ 61

５．３　量子カスケードデバイスの進展　枝村　忠孝（浜松ホトニクス）·········· 66

５．４　光コムの進展と分光応用　岩國　加奈（電気通信大学）············ 72

６．総合討論··· 79

付録·· 91

付録１：開催趣旨・プログラム·· 91

付録２：参加者一覧·· 93

1．趣旨説明

曽根　純一、馬場　寿夫（科学技術振興機構　研究開発戦略センター）

光技術は重要な技術基盤であり、その先端の科学技術分野でどんな新しい動きがあるのか、産業界も含めた社会のニーズがどうなっているのか知っておくことは、技術俯瞰および国へ戦略的提言をしていく上で必要である。IoT、AI の時代に入って、光技術は活躍の場が大きく広がっている。アプリケーションとしては、AR/VR があり、車にも様々な形で光技術が入って重要な役割を果たしている。

コンピューティングの世界でもシリコンフォトニクスなどが徐々に重要なポジションを占め始めていると認識している。また、5G、6G などモバイル通信でイノベーションが起ころうとしている。それは同時に光技術にも波及し、一緒に進展していかないといけない。医療、バイオを考えてみると、様々な形でイメージングが使われている。このように、光に関する産業が大きく花開こうとしていると認識している。

研究開発の提言を行う我々はその次の時代を見ないといけない。これらがさらに発展してどのような方向へ行こうとしているのか、さらにそれをサポートする光の基盤技術あるいは基礎技術として何が重要で、どんなことが起きているのだろうか。これらを把握するために、この俯瞰のワークショップを開催する。この光技術の分野の先端で活躍している方々と一緒に議論をさせていただき、国への提言へのステップにしたいと考えている。

ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰報告書（2019 年版）を今年発刊した。その２章に俯瞰区分と研究開発領域を記載しており、2019 年版の場合には 32 領域を抽出し、国内外の状況を報告している。しかし、32 領域しかないため全ての技術領域をカバーすることはできていない。また、その領域の抽出も我々の視点で決めているため、必ずしもそれが最適かどうかはわからない。特に、光技術分野は様々なところに分散しており、まとめ方についても今後は検討が必要と考えている。

図 1-1 は、2019 年版で作成した俯瞰図であり、上部に社会とのかかわり、下部に技術領域を示している。デバイス・部素材、物質・機能、基礎的技術、共通支援策といった項目で必要な技術をまとめている。この図を見てわかるように、光の技術はフォトニクス、バイオイメージング、レーザー加工、放射線計測、といったところにばらばらと入っている。しかし、光技術全体を俯瞰している形にはなっておらず、これが今回の問題意識になっている。

図 1-2 に今回のワークショップの趣旨を示す。この光技術とプロセス・インフォマティクスが今後重要になってくる領域だと考え、今年度にこの２つに関する調査を行い、ワークショップを開催して来年度の俯瞰報告書に反映させるとともに、戦略プロポーザルの候補になるものを見出すことを目指している。２番目は先に述べた通りである。また、2013 年度にも光に関する同様のワークショップを開催して光技術の俯瞰図を作成したが、そのときの俯瞰図のままで良いのか、現状に合わせて変える必要があると考えており、どのように変更すべきか考えたい。

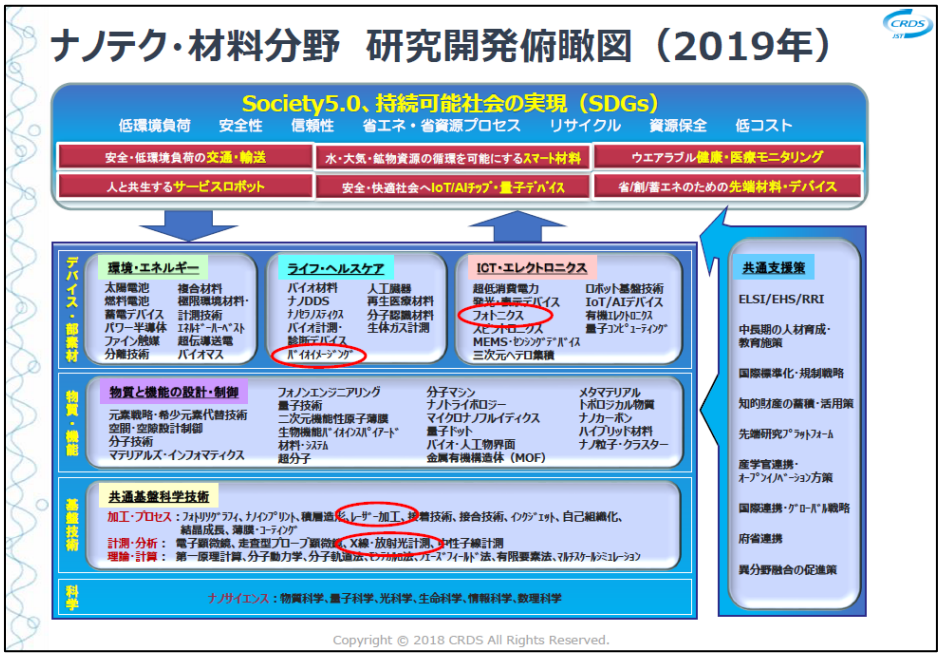


図 1-1　ナノテク・材料分野　研究開発俯瞰図（2019 年）

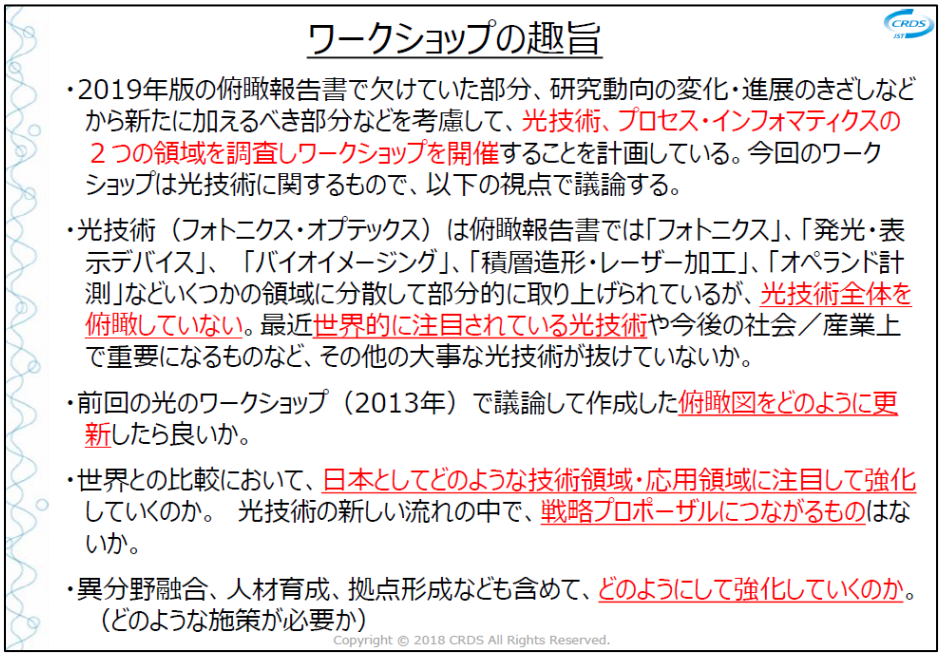


図 1-2　ワークショップの趣旨

さらに、光技術に関する世界の潮流を意識した中で、日本としてどのような技術領域、応用領域に注目して強化していくべきかを検討することは重要であると考えている。これがある程度わかれば、戦略プロポーザルに繋げていくことも可能と思われる。総合討論では、技術力に関することに加え、他の領域と一緒に新たな領域を作る異分野融合、人材育成、効率的に研究を進めるための研究拠点など、どのような形で日本の技術力を強化していけばよいのか議論したい。

光を取り巻く環境としては、以下のように考えている。社会との関係として、光技術はかなり成熟しており、産業としても成熟している。例えば、光通信、ディスプレイ、太陽光発電、レーザー加工などは産業として成り立っている。しかし、日本の最近の傾向として、産業競争力が低下している。特にエレクトロニクス、通信、計測分野などは厳しい状況になっている。もちろん、材料、デバイス、コンポーネントレベルでは頑張っているが、全体的に見ると低下していると思われる。光関係の要素技術については、学会等を中心に新しい技術が出てきて高度化しているが、社会に与えるインパクトが少し見えづらくなっている。異分野との融合については、最近はバイオや医療関係の新しい領域で光技術は非常に重要になってきている。しかし、例えばレーザー装置や計測装置などは、日本の製品よりも海外の製品が大きな存在感を与えている。産業は成熟しているので、それぞれが固定化され独立した形になっているように見える。学術分野においても、様々な学会の中で細かな領域が作られており、その領域も固定化、細分化されており、新しいことを始めるためには問題になると思われる。バイオ・医療など異分野への対応については、様々な光の技術領域が連携して融合技術や統合技術の開発が必要になるが、これらの動きが鈍いように思われる。特に、最近の学会では産業界の人が減ってきており、産業界とアカデミアとの接点や協業の場が少なくなっているのも問題である。このようなことから、光技術全体を横串して考え、日本としての戦略を考える必要がある。

なお、補足ではあるが、フォトニクス関係の技術として光材料・デバイスから計測技術、加工技術などを並べてみると、様々な技術があるのが見えてくる。また、アカデミア、研究コミュニティーに関しても、日本光学会、応用物理学会、レーザー学会など、それぞれの学会の中で、細かくセッションが組まれており、かなり細分化されているのが見えてくる。

このような状況の中で、最近の注目される技術を CRDS としてまとめたものが図 1-3 である。ここでは、左側に応用として自動運転、通信、ディスプレイなどを記載している。最近注目されている技術としては、自動運転では LiDAR やイメージセンサ技術があり、通信ではナノフォトニクス、シリコンフォトニクス、トポロジカルフォトニクスといった新しいキーワードがある。ディスプレイではマイクロ LED、紫外 LED、センサ関係では量子センサなど、医療・バイオ関係ではオプトジェネティクス、光音響イメージングといったキーワードも出ている。さらに、最近は情報処理技術が少し行き詰まってきている。シリコンの集積回路（LSI）の微細化がだんだん難しくなってきており、新しいコンピューティング技術を考える必要性から、光の技術を使った光コンピューティング、光 AI といった領域も活発化している。量子コンピュータの領域にも光技術を使ったものも提案されている。逆に、最近のコンピューティング技術の発展をうまく使ってイメージング、光デバイスの設計に利用するといった動きも出てきている。加工では光渦があり、計測では光コム技術がかなり注目されている。レンズ系では、メタマテリアルの一つであるメタサーフェスの技術もかなり注目されている。

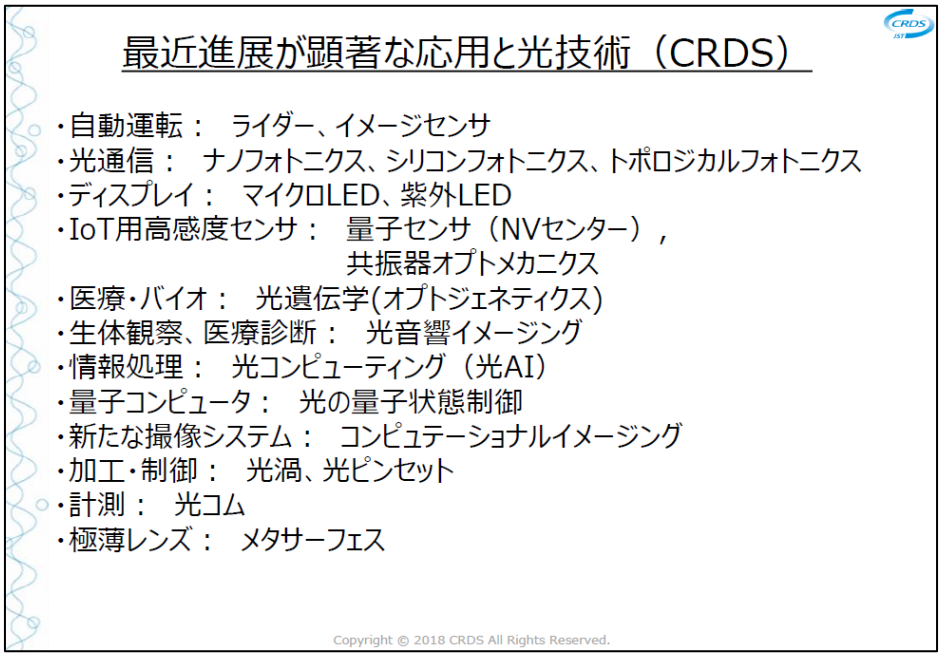


図 1-3　最近進展が顕著な応用と光技術

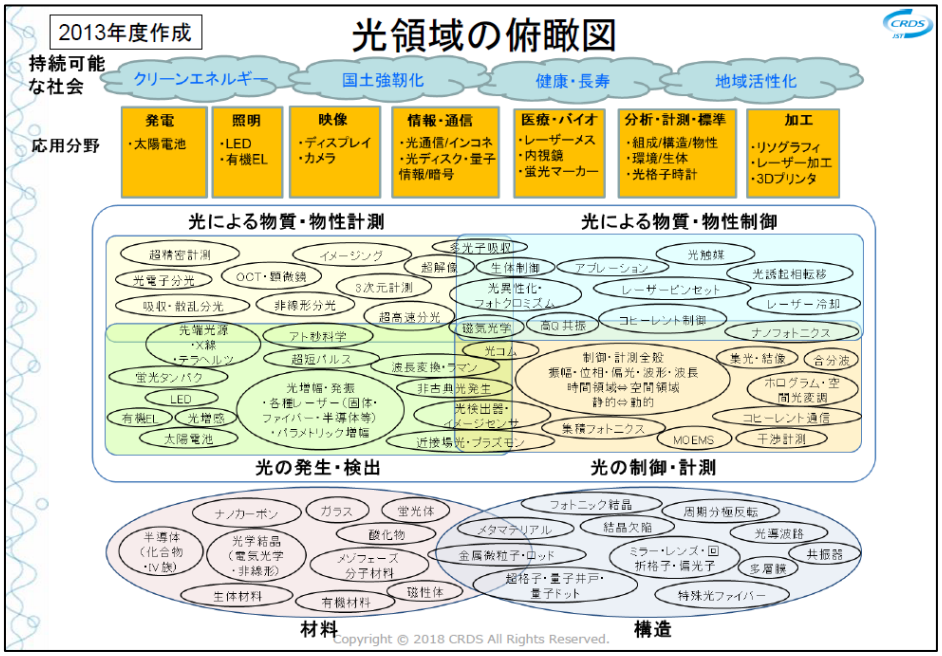


図 1-4　光領域の俯瞰図（2013 年度作成）

図 1-4 は 2013 年に作成した俯瞰図である。この俯瞰図は、このときのワークショップの総合討論（コーディネーター：河田先生）で議論し、その後に小関先生などの参加者にメールベースで議論してもらいまとめたものである。この図では、上部に社会との関係があり、その下に光による様々な機能、物質の制御、光の発生、検出、計測関係などの項目がまとめられている。この中には様々なキーワードがあり、今でも生きているキーワードもあるが、逆に最近ではキーワードとして古くなって、違うものに変えたほうが良いものも含まれている。

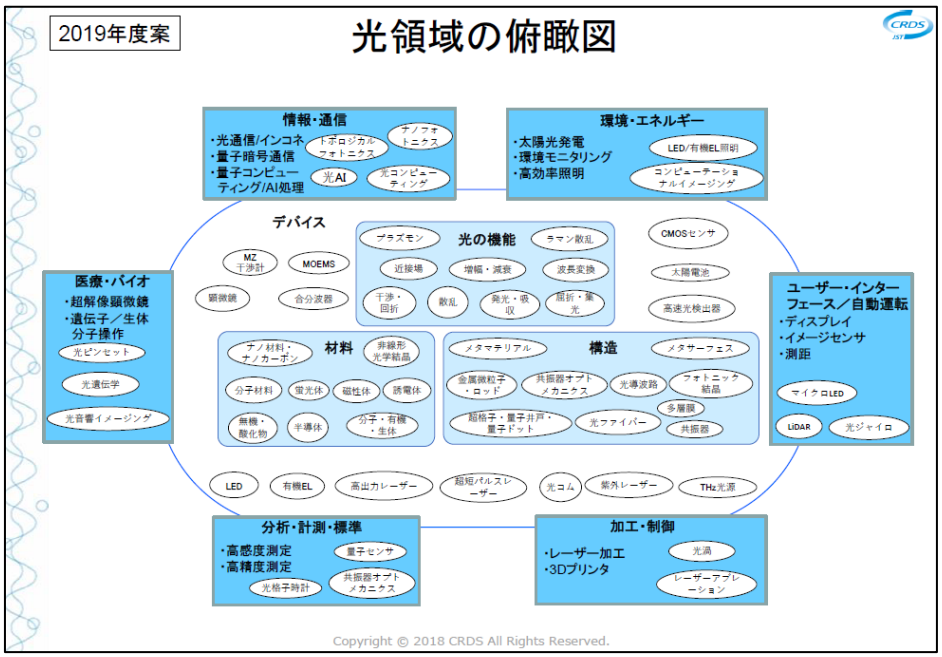


図 1-5　光領域の俯瞰図（2019 年度案）

図 1-5 は今年度検討している俯瞰図の案である。この図では、中心部に光の機能、材料、構造といった基盤的な技術を記載し、その周りにこれらを利用したデバイス技術を配置している。さらに外側に、産業や社会に利用される分野として、エネルギー、ユーザー・インターフェース、加工・制御、分析・計測・標準、医療・バイオに利用される技術を配置している。時代の流れを表す視点など、このまとめ方とは異なる視点も必要と思うが、どのような俯瞰図が良いかについても議論したい。

2．光技術の最新動向

中野　義昭（東京大学）

光産業技術振興協会の技術動向調査委員会では、光技術の毎年の進展に関して定点観測を行なっており、平成 30 年度の報告書から抜粋して紹介する。動向調査委員会は、光材料・デバイス、光情報通信、情報処理フォトニクス、光加工・計測、光エネルギー、光 UI・IoT の 6 つの分科会に分かれて活動をしている。この中で光材料・デバイス分科会はシーズに関連した調査を行っているが、他の分科会はアプリケーション、つまり社会とのインターフェースに沿った調査をしている。

まず第 1 分科会（光材料・デバイス）はシーズ技術を扱っており、図 2-1 に示すように、テラヘルツから UV、あるいはディープ UV までの非常に広いスペクトラムの中で調査している。例えば、周波数ごとに見ていくと、Uni-Traveling- Carrier Photodiode（UTC－PD）に 2 つの光を入れて、その差周波としてのテラヘルツを電気として取り出すことが、非常にうまくできるようになっている。これによって、高出力、高効率で電気としてのテラヘルツを光を使って合成することが可能になってきた。

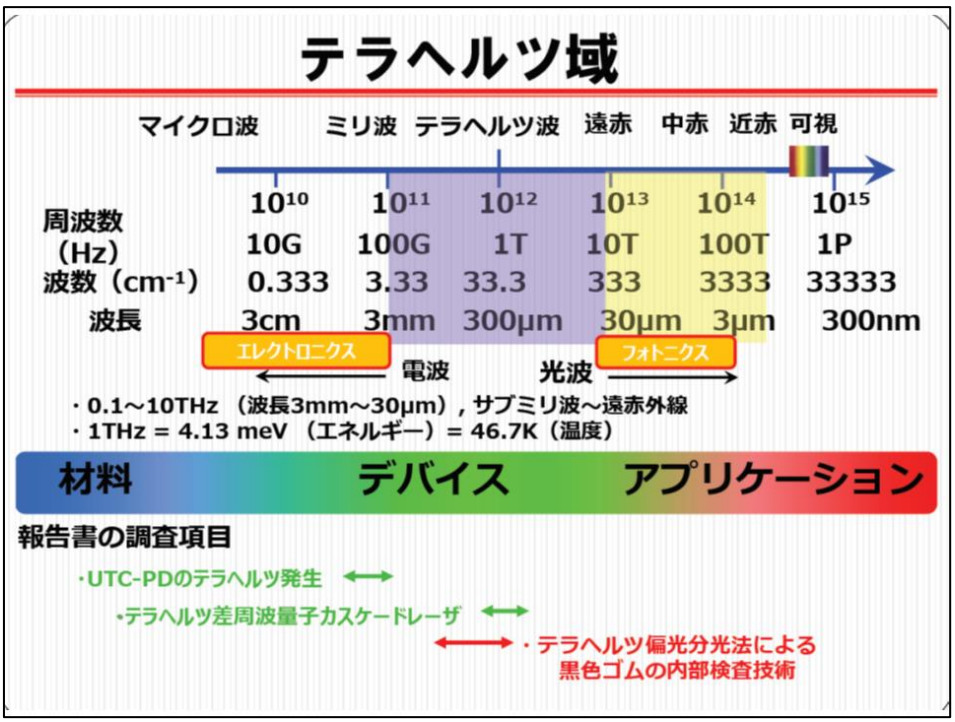


図 2-1　テラヘルツ領域

別の発生の仕方として、量子カスケードレーザの差周波を使ってテラヘルツを作る技術も昨今、相当進展している。さらに有機電気光学ポリマーに短パルスのレーザを入れて、周波数コムの差周波を使ってテラヘルツを生成することがうまく行くようになってきた。

従来の光エレクトロニクスの主戦場であった近赤外領域では、3 次元光配線技術が進展してい

る。光送受信技術に関しては、偏波の制御や、UTC-PD の集積，SiGe ベースのマッハ・ツェンダーの変調器が 128Gbit/s で動くことなどが報告されている。

さらに、CMOS プロセスで変調器とドライバーを一括形成すると、電気と光の真の集積で高速化を達成できる。超小型プラズモン変調器で 36μm というサイズで変調器を作るなどの試みも行われており、ヘテロジニアス集積に関しても幾つか実例が出てきている。ヘテロジニアス集積では、シリコンとⅢ-Ⅴ族化合物半導体を接合するアプローチが主流になっている。モノリシックの例としては、GaAs 上のフォトニック結晶レーザが、高出力かつビーム操作可能な面発光型のデバイスとして発展してきた。フォトニック結晶は従来いろいろなところに使われてきたが、今この面発光デバイスが非常に強力な出口になりつつある。可視・紫外域に関しては、青から緑の半導体レーザの高出力化が着実に進展している。青は 455nm で Wall-Plug Efficiency 43.4%、5.25 Wという出力が出ている。窒化物を使っても緑色を出すのは難しかったが、532nm で 17.1%、1.19Wという、青色に徐々に追いつくレベルの出力や効率が出るようになってきた。面発光レーザもこの GaN で良いデータが報告されている。窒化物で赤色を出すのは、緑よりさらに難しいが、Eu（ユウロピウム）をドープして赤色が出せるようになってきた。窒化物で RGB が全て出せる可能性も出てきた。

第 2 分科会（光情報通信分野）の報告によると、光通信はさらなる発展を続けており、様々な新しい技術が開発されている。図 2-2 にリサーチトレンド、商用化トレンド、Ethernet 系トレンドを示す。

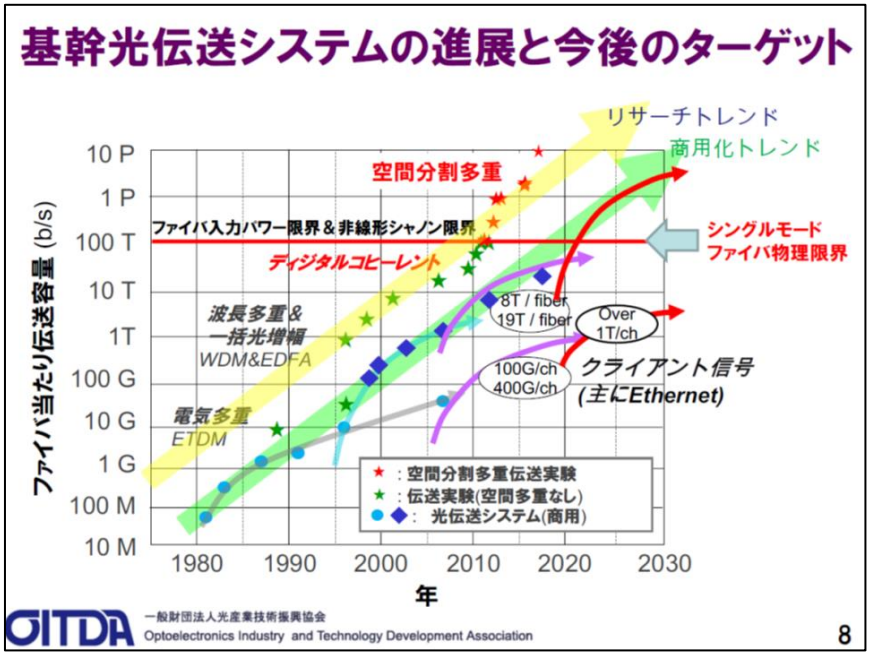


図 2-2　基幹光伝送システムの進展と今後のターゲット

現在のリサーチトレンドは、空間分割多重伝送技術等を使ってシングルモードファイバの物理限界を超えて進展している。商用化の方もかなり物理限界の近くまで来ている状況である。Ethernet も 400Gbps まで到達しており、いつか止まると言われていた予測を裏切り、さらに進展している。

基幹光伝送システムの技術領域では、１チャネル当たりで 1 Tbit/s を超えるような高速化が出てきている。さらに超広帯域光信号の生成技術や空間分割多重の伝送システムの長延化も進展している。1 Tbit/s を超えるチャネル高速化の技術では、複数の DA コンバータを束ねて、一つの超広帯域の Super-DAC を実現して、spectral density を極限まで高めるような形で大容量化を実現している。広帯域の送受信技術に関しても高ボーレート化が進展している。フォトニックノード技術に関しては、WDM メッシュ構成への進展が進んでおり、空間分割多重技術が光ノードに適用され、ring が multi-ring 構成になって、今日 WDM mesh になり、それを Software Define Network（SDN）で制御して使っている。このネットワークでのキーコンポーネントは波長選択スイッチ、WSS と言われるもので、その中で MEMS 方式と LCoS 方式があるが、今はエラスティック NW への適用性から LCoS タイプに注目が集まっている。アクセスネットワークに関しては、現在、50G-EPON システムが主流であるが、2020 年 4 月標準化完了を目標に進められている。Ethernet は今、400Gb/s の規格が 2017 年度末に標準化が完了し、その次に 800Gb/s Ethernet、1.6Tb/s Ethernet と続き、これから標準化が議論される。

第 3 分科会（情報処理フォトニクス）では、図 2-3 に示すように、光メモリ、光演算、機械の中の光インターコネクトなどを扱っている。

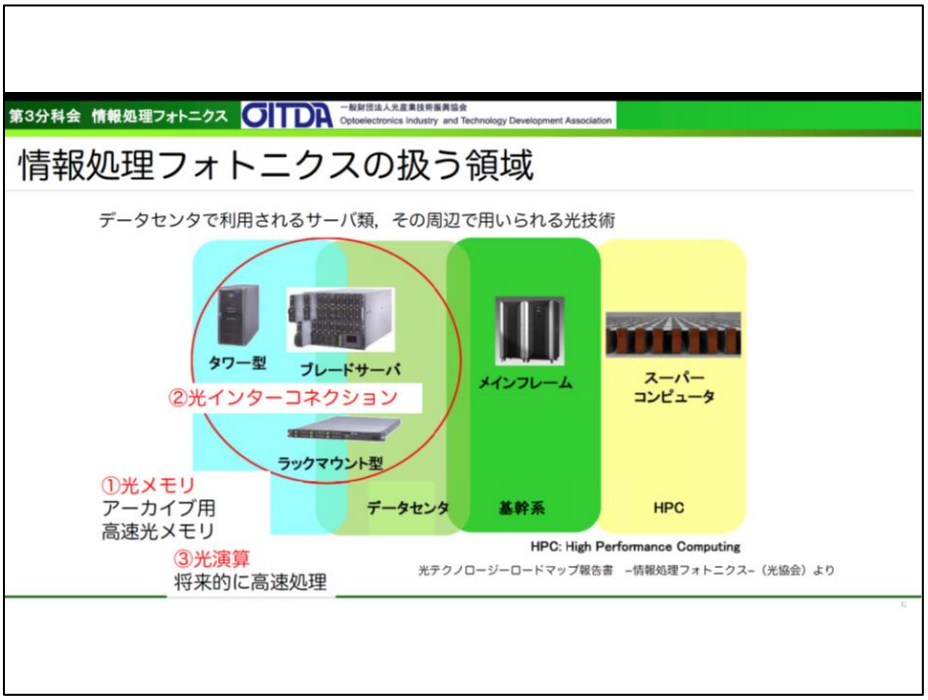


図 2-3　情報処理フォトニクスの扱う領域

光ディスクは DVD、BD、BD-XL と発展してきて、現在、Archival Disc（AD）になっている。従来、光ディスクによる記録はディスクの溝の上だけを使っていたが、最近は溝の下も全て記録場所に使い、記録密度が飛躍的に上がっている。データセンタ内の光インターコネクションも、従来は AOC と呼ばれていたものが、さらに容量、本数が増加して、特に COBO と言われるボード上に集積するようになり、さらに co-packaging（COPA）になっていき、パッケージ中に光と電気を一緒に実装する方向に進展している。ボード間の光インターコネクトに関しては、従来型に対して VCSEL のような新しい技術が出てきている。ボード内の光インターコネクトについても、従来型に対して、やはり VCSEL を活用したものが出てきている。コンピューテーショナルセンシング・イメージングも、この分科会の非常に大きなテーマになってきており、特にゴーストイメージングが様々な形態で発展している。例えば電子ビームでゴーストイメージングをするなどのアイデアが提案されている。さらに空間光変調器やホログラムメモリも進展している。

第 4 分科会（光加工・計測分野）は、図 2-4 に示すように微細加工などを扱っているが、そのトレンドとしては、例えば携帯機器はレーザ加工で作るのが一般的になっている。

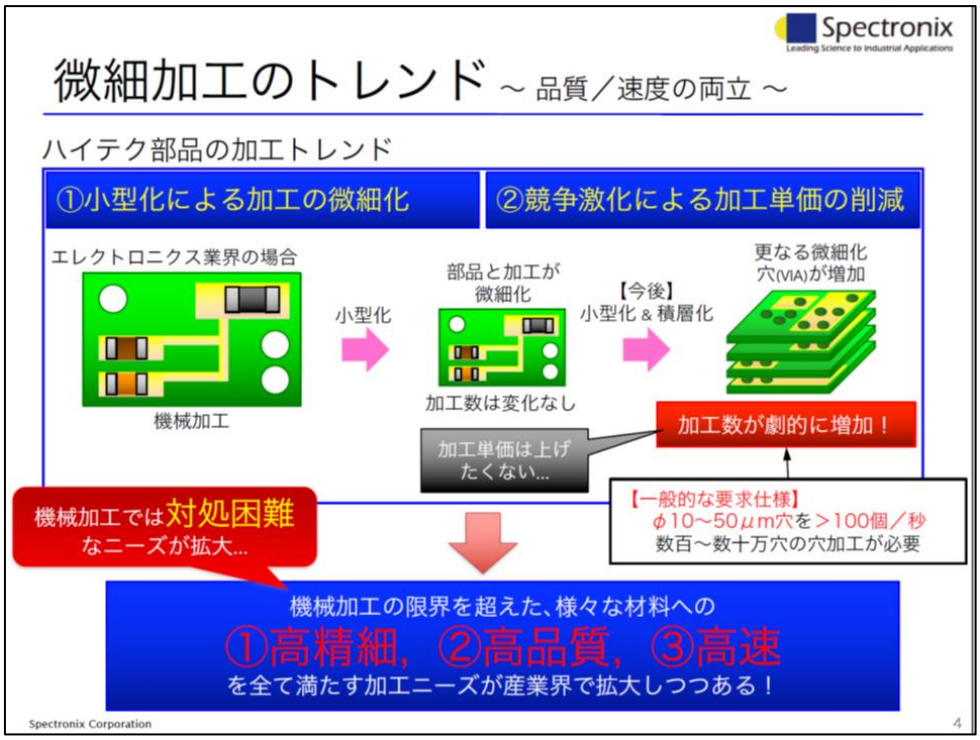


図 2-4　光技術における微細加工のトレンド

最近は短パルス化・短波長化したピコ秒 UV レーザが市販されるようになり、微細レーザ加工の技術が容易に使える。最近のピコ秒の加工用ハイブリッドレーザの特徴は、ゲインスイッチの半導体レーザの光を強烈に増幅して、それに波長変換を 2 回かけて UV にしている。例えばエレクトロニクス加工専用の 355nm のピコ秒レーザでは、元の光は DFB レーザのゲインスイッチで出している。

第5分科会は光エネルギー関係を扱っている。有名なNRELの太陽電池の変換効率記録の図（図2-5）に示すようなトップの効率が出た技術を調査している。結晶シリコンに関しては、N 型で26.7%出ているが、P型でも 26.1%出るようになった。CIGS は 23.55%の変換効率が達成されている。一番注目されているペロブスカイト太陽電池は、中国企業が 23.7%というトップデータを更新した。ペロブスカイトを使ってタンデムにするとかなりの変換効率が出る。オールペロブスカイトだと単一のものよりも少し効率が落ちて 19.1%であるが、シリコンとペロブスカイトの組み合わせで 27.3%、CIGS とペロブスカイトで 23.9%などが最近の効率の最高値である。ただ、太陽電池全体で見たときの効率の最高値は、NREL が 6 ジャンクション、つまり 6 つの太陽電池を縦積みにした多接合で 47.1%を出しており、これが全体のトップデータになっている。太陽電池変換効率の一番大きな注目点は、どこの機関が最初に 50%を超える効率を出すかである。プリウスに 38%くらいの高効率の太陽電池を付けると、走っている間にさえ充電できると言われている。

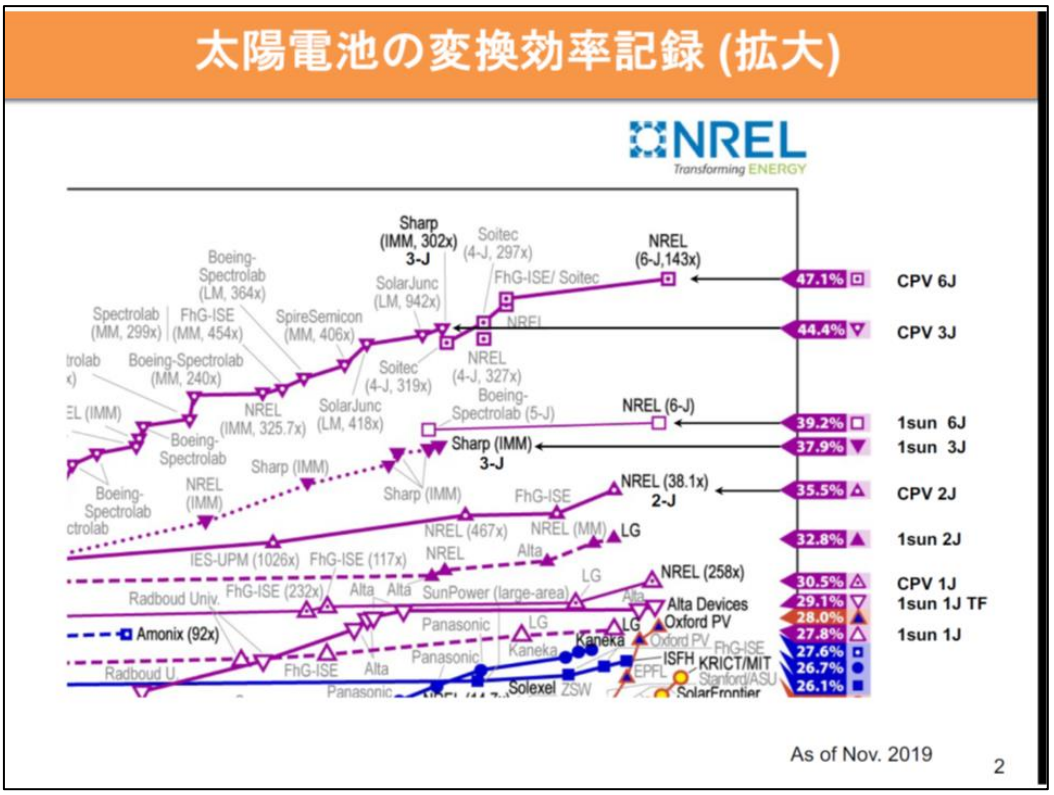


図 2-5　NREL による太陽電池変換効率変遷のチャート（一部を抜粋）

第 6 分科会は、デバイスや IoT 関連を調査している。ディスプレイはかなり成熟しているものの、いまだに進歩している。入出力デバイスとしてのタッチパネル技術は、フレキシブル化と非接触入力が注目技術である。単一での進歩というより、入出力デバイスとしての進展と言ったほうが良いであろう。例えばドローンに LiDAR をつけて空から見ると、町のモデルができるという非常に進んだ使われ方がされている。AR、VR でも、表示としてはヘッドマウントタイプと設置（劇場のようにして見る）タイプがある。最近は見るだけではなく、自分で感じることで、超

人的な体験ができるという、人間拡張技術に進化してきている。従来の環境を模擬して生体に感じさせることだけではなく、生体がアクションしたものが環境に与えられ、その環境からまた新しい情報が生体に与えられることによって、従来では不可能な人間の感覚、超人的感覚が再現できるようなところに、光技術が使われつつある。ただ、この分野では日本は少し遅れているのが気がかりである。最後に、クラウドは言い古されており、最近は Fog の考え方が重要になっている（図 2-6 参照）。IoT から上がってくるデータ量が非常に多いために、全てをクラウドに上げることはできない。クラウドまで上げると往復の遅延時間のために拡張現実感や超人をつくり出す上で、とても間に合わなくなる。今後はクラウドに上げないでエッジで処理することが必要になる。

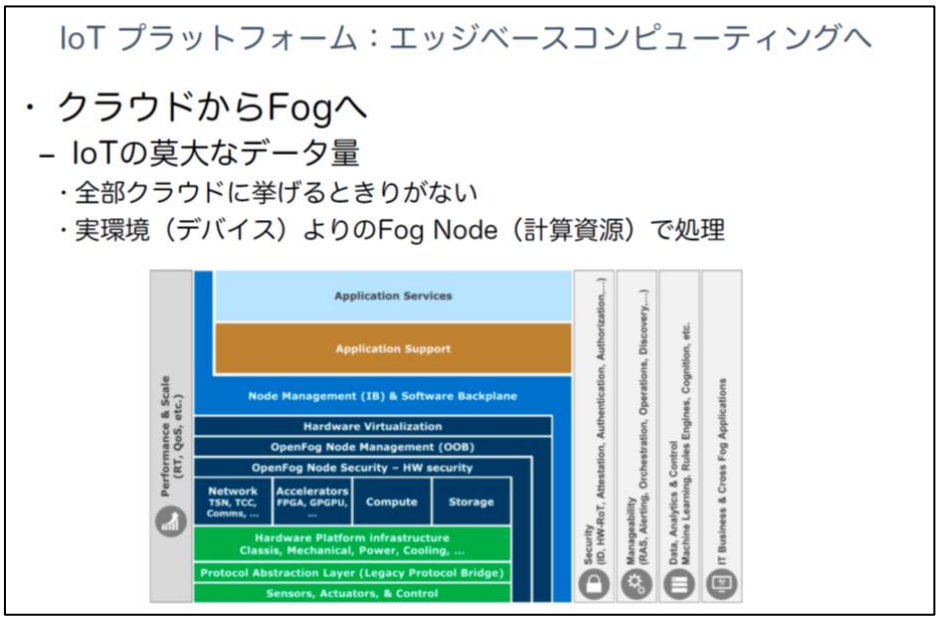


図 2-6　IoT プラットフォーム：クラウドから Fog へ

3．コンピューティング技術

3．1　リザーバーコンピューティングと意思決定への応用

内田　淳史（埼玉大学）

本発表では、初めに光アクセラレータ技術について説明する。この中で、光アクセラレータ技術の主な技術としてリザーバーコンピューティング、強化学習、意思決定について紹介する。次にこれらの基盤となる基礎研究として、複雑系フォトニクスについて紹介し、最後にまとめる。

光アクセラレータ技術という言葉は余り聞き慣れないかもしれないが、これは大阪大学名誉教授の北山先生が最近提唱された考え方である。図 3-1-1 に示すように、光入力が入ってきたときに、それに何か前処理をしてデジタル化する際に、コンピュータの中で全て処理をするのではなく、光信号を光の状態で前段階の処理を行って、コンピュータの負荷を軽減するといった概念に基づいている。

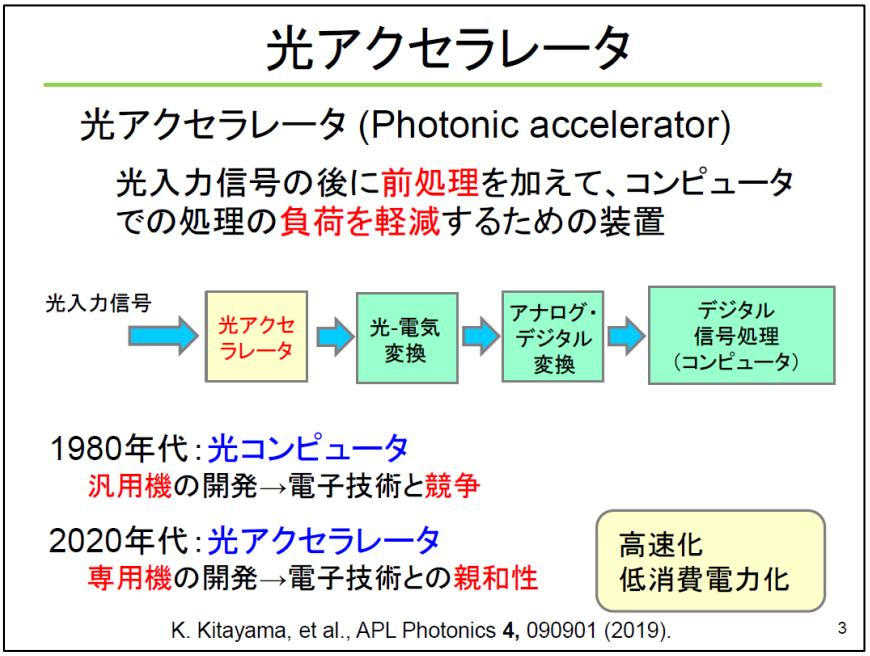


図 3-1-1　光アクセラレータ

光コンピュータという言葉が 1980 年以来、30 年ぶりに聞かれるようになっているが、1980 年代の光コンピュータは、現在のコンピュータに対抗して光技術で汎用機を開発することを目標にし、電子技術と競争していた。最近の電子技術の発達が非常に著しいため、光は電気に対抗するのではなく、あくまで専用機として光の得意な部分だけを開発し、その他の部分は電子技術に任せるという、電子技術との親和性を主に考えている。このため、北山先生は光コンピュータと区別して、光アクセラレータという名前で定義されている。ここでは、特に光の特性を活かした高速化、低消費電力化を目指して開発を行っていく。

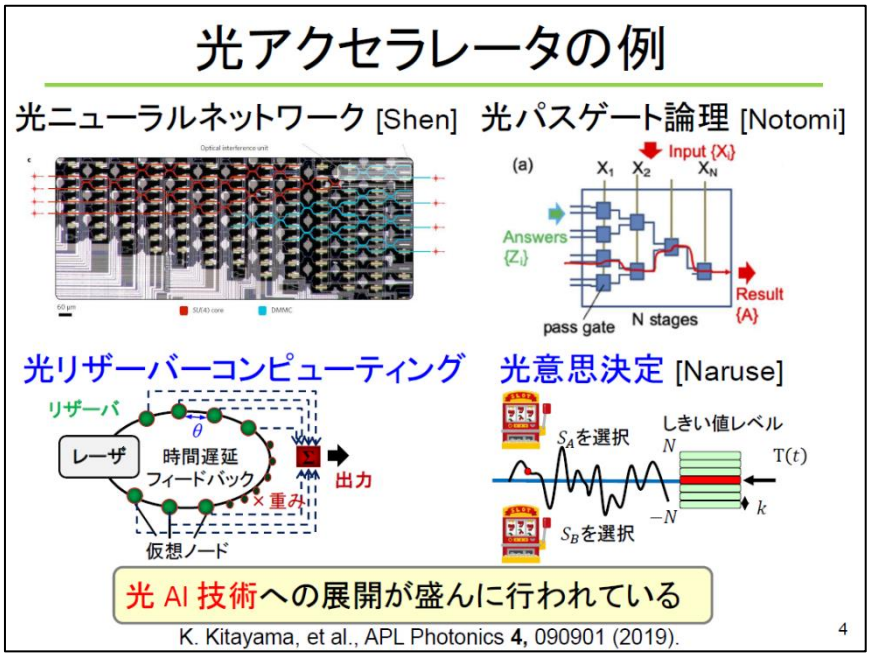


図 3-1-2　光アクセラレータの例

光アクセラレータの主な例の１つは光ニューラルネットワークである。図 3-1-2 の左上は「Nature Photonics」に出た論文であり、いわゆるディープラーニングの重み付き線形和の処理を光で全て行っている。右上は納富先生が行っている光パスゲート論理であり、光で高速に論理演算を行う回路である。左下の光リザーバーコンピューティングについては、NTT でも行っているが、光ニューラルネットワークに似た考え方で前処理を行っている。右下は東京大学の成瀬先生らと一緒に取り組んでいる光意思決定の研究である。これらを含めて光 AI と呼んでいるが、電子技術と対抗するのではなく、電子技術をサポートするものである。光アクセラレータとして光技術で何ができるかを考えていることが最近の研究トレンドだと考えている。

続いて、光アクセラレータの具体的な内容であるリザーバーコンピューティングについて紹介する。リザーバーコンピューティングの「リザーバー」は英語では「reservoir」であり、貯水池やダムの意味である。つまり、水のたまったものを使って何かコンピューティングができないかという発想である。例えば、水面に石を投げると波紋ができるが、石を入力、その波紋の形を出力と考えるものである。石を１個投げると波紋が一つ出るが、石の数を２個とか３個と増やしていくと、波紋の形が入力に応じた形に変化する。一見すると、石と波紋には対応がなさそうに思われるが、そこには入出力関係がある。一定の関係があれば、ある種のコンピューティングができ、これがリザーバーコンピューティングの発想となっている。例えば、分類や予測などの処理がこれでできる。

リザーバーコンピューティングの元は、ニューラルネットワークにある。ニューラルネットワークは２種類あり、１つはディープラーニング（深層学習）と呼ばれる階層型のニューラルネットワークであり、もう１つはリカレント（再帰型）ニューラルネットワークであり、図 3-1-3 に示すようにネットワーク同士が相互に結合しているネットワークである。

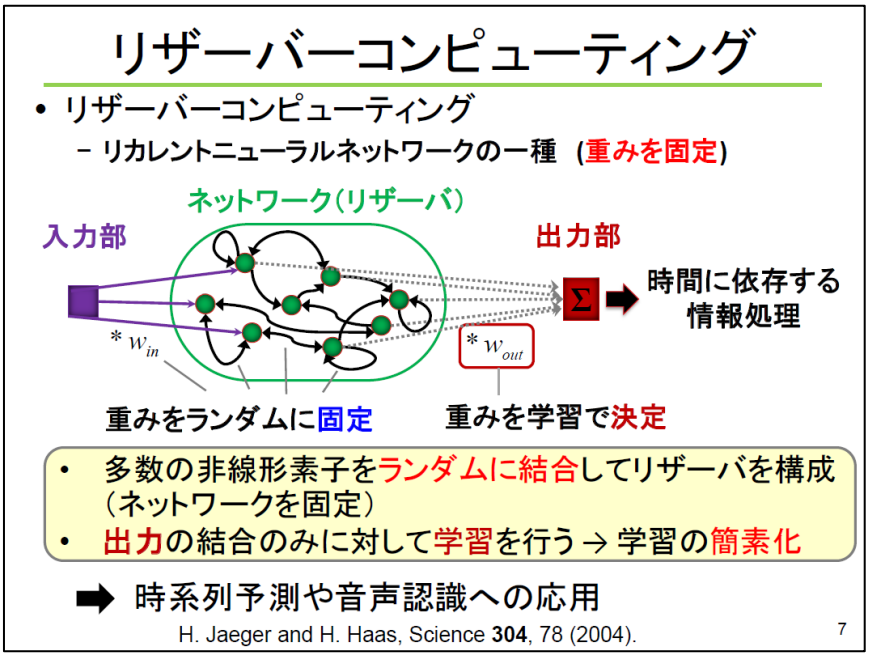


図 3-1-3　リザーバーコンピューティング

リカレントニューラルネットワークにおいては結合の重みを決めることが大事であるが、その学習が非常に難しいという問題がある。その解決策として、多少強引ではあるがネットワーク（リザーバー）の重みを固定し、ネットワークから出てきた出力の部分だけを学習で決めるのがリザーバーコンピューティングの考え方である。出力の重みだけを学習するので、リカレントニューラルネットワークであっても学習が非常に簡単になるメリットがあり、現在は様々な応用で実用化されている。特に重要なのは、機械学習はネットワーク内部の重みを変えることが大事だったが、内部の重みを変えなくても機械学習ができることである。物理デバイスは構造が決まっているので、物理デバイスを使ってもこのような機械学習が可能になる。これがリザーバーコンピューティングの一つのパラダイムシフトになっており、物理システムを使って機械学習をする最近のトレンドになっている。

図 3-1-4 にリザーバーコンピューティングの考え方を示す。ある入力があったときに、それをリザーバーに入れ、そこで非常に複雑な形にして次元を上げて出力するものである。それによって信号の分類を簡単化している。例えば２次元空間上に丸と星のマークがあったとしたとき、これを１本の線で分離しようとすると、どうしても１本の線では２つのマークを分離することはできず、２つの線が必要になる。これは線形分離不可ということになる。しかし、例えば３次元空間にして、赤い部分をＺ方向の大きい部分に射影し、星の部分をＺ方向の小さい部分に射影すると、図に示すように１枚の平面で２つのマークを区別することができる。このように高次元空間に持っていくことにより、線形分離が可能になる。入力を高次元空間に変換することで情報処理を行うというのがリザーバーコンピューティングの考え方になる。

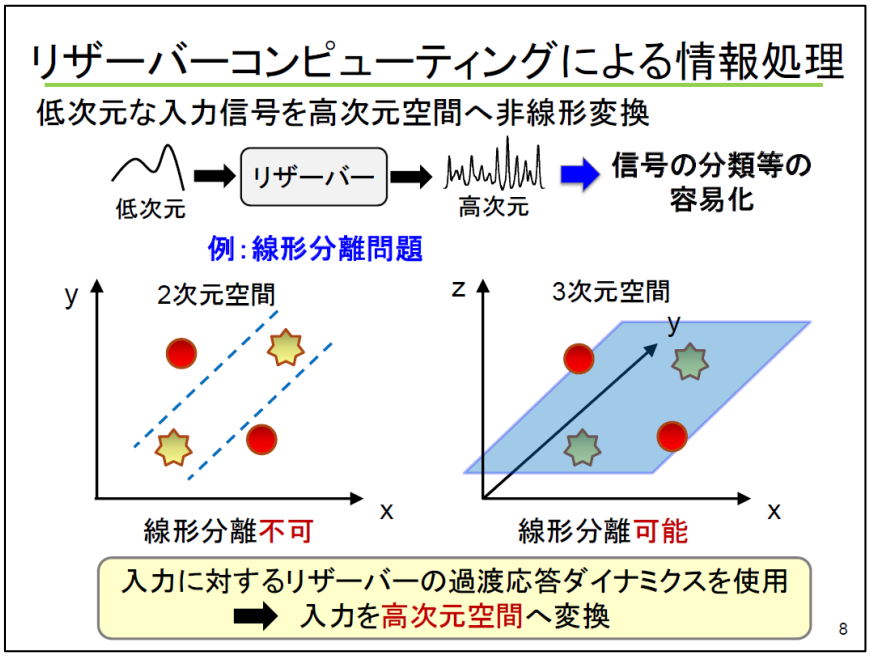


図 3-1-4　リザーバーコンピューティングによる情報処理

このリザーバーコンピューティングになぜ光を使うのか説明する。光デバイスを使う利点としては、信号処理の高速化、低消費電力化などが挙げられる。また、空間、時間、波長など様々な自由度があるので、このような多次元化に対して効率的に処理が行えることがある。さらに、光計測信号との相性も非常に良く、測ったものをそのまま処理でき、エッジコンピューティングのようなことがすぐにできるというメリットがある。

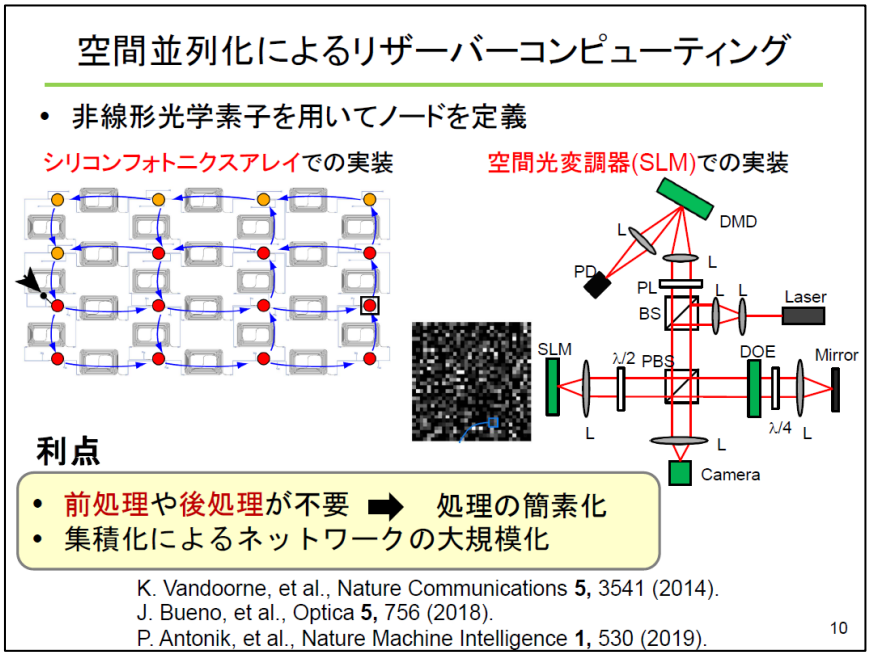


図 3-1-5　空間並列化によるリザーバーコンピューティング

これらに加え、既存の光技術、光集積回路、シリコンフォトニクス、光通信技術が成熟しているので、これらの技術をリザーバーコンピューティングに応用することによって、新しいアプリケーションが生まれると考えている。図 3-1-5 はリザーバーコンピューティングの実装例である。図の左側は、それぞれの非線形素子をニューラルネットワークのニューロンと仮定して、それらを空間的に結合するものであり、シリコンフォトニクスアレイで 16 個のニューロンを実装した例である。また、図の右側に示すように。空間光変調器を使い、空間光変調器のあるピクセルのグループを１つのニューロンと仮定して、それらがフィードバックによって結合する状況をつくり出すことによりリザーバーコンピューティングが実現できる。これを使うと、ニューロンの数を光集積回路によって増やすことができ、実際のニューラルコンピューティングも光で実現可能となる。

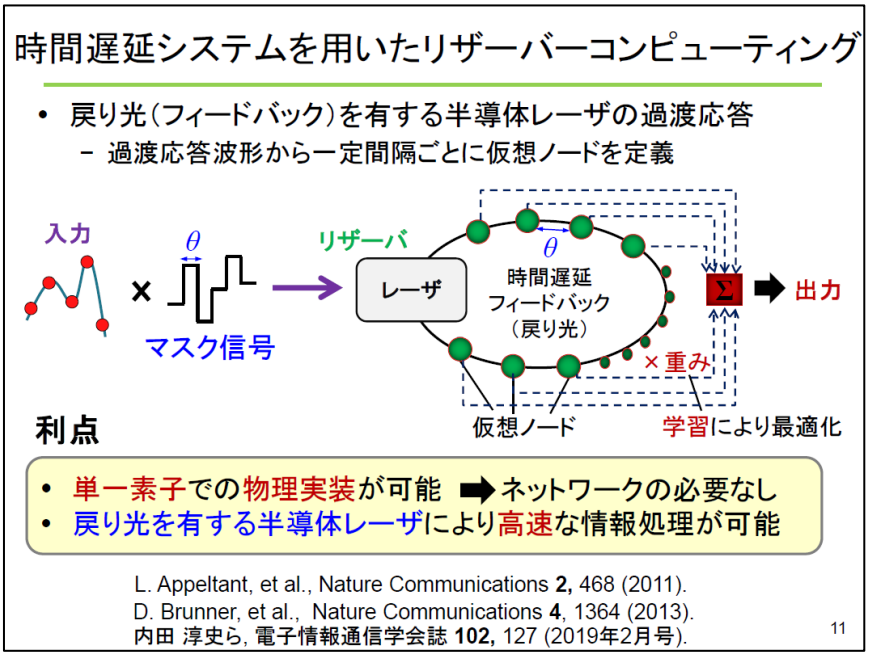


図 3-1-6　時間遅延システムを用いたリザーバーコンピューティング

先に述べた空間的なニューロンではなく、図 3-1-6 に示すように時間的に分割したニューロンを作ることもできる。レーザの光を戻すことにより、この戻り光のある部分を時間的に分割し、この戻り光のそれぞれの出力を仮想ノードと仮定してネットワークを構成し、出力を仮定することで実現することも可能である。レーザと戻り光だけで実現できるので、個々のニューロンをつくる必要がなく単一素子で物理実装ができるため、近年注目されている。さらに、戻り光を有する半導体レーザ使うことにより、非常に高速な情報処理が可能になることも知られている。

リザーバーコンピューティングの応用について説明する。１つには時系列を予測するといった応用がある。また、音声認識や動画の分類なども行われている。さらに、コヒーレント通信の信号補償を実時間で行うことも可能であり、計測や分析などに有用であると考えられる。この特徴としては、リザーバー自体が記憶機能を持っているので、例えば予測などのように過去の情報を使って処理をするものに適している。また、出力の重みだけを学習するので、学習が非常に簡単

である。通常の深層学習（ディープラーニング）では、画像データで学習するのに何週間もかかるが、リザーバーコンピューティングであれば数分から数時間もかからずに終わってしまう。さらに、簡素な前処理ができるので、エッジコンピューティングなどに使えると考えている。

我々が行った例としては、光集積回路をリザーバーとして用い、戻り光がある光集積回路を使うことによる、波形の予測実験がある。実際には予測誤差は 1%以下になり、このように実際に光を使って時系列予測が可能なことが示された。

次に強化学習と意思決定について紹介する。先に述べたリザーバーコンピューティングは教師あり学習であり、ある入力と出力の対応があらかじめわかっているデータを学習して重みを決定している。一方、強化学習は入力と出力の関係がわかっていない場合に対応する。例えば、ゲームなどで新たな手を打って進めていくときに、どの手が正しいのか全くわかっていないような場合である。このような場合には、報酬というものを使って学習を行う必要がある。これも情報分野では大きなニーズがあり、ゲームの他にも株取引やロボットなど、当たりがどれかわからない状況の問題がたくさん存在している。

我々が注目しているのは多腕バンディット問題である。その例としては、スロットマシンがたくさんありその当たりの確率がどれもわからない状況で、報酬を最大化させるためにどのスロットマシンを選んだらよいかを決めるものがあり、数学的に定式化されている。この場合、スロットマシンを引かないとどれが当たり確率が高いかわからない。しかし、全てのスロットマシンを引いてしまうとコインが全部分散してしまい、儲けられない。このため、どの程度探索を行い、その探索で得た知識を使ってどこにつぎ込むか、そのバランスが非常に難しい問題として知られている。

これを解決するために、綱引き理論と呼ばれる理論を用いた意思決定というものが提案されている。これは生物の粘菌のモデルからつくられたモデルである。２台のスロットマシンがあって、どちらかを選択することを考える。０から１までの１本の綱に対し、しきい値をまず真ん中にしておく。０から１の間の乱数を振り、乱数が 0.5 より小さければスロットマシン A を選択し、もしもその選択したスロットマシンが当たりであれば、こちらのほうが当たり確率が高い可能性があるので、少し綱を 0 の方に引く。そうすると、スロットマシン A が選ばれやすくなる。逆に外れた場合には、もう片方のスロットマシンが当たりの可能性が高いので１の方に綱を動かす。このように綱を引いたり押したりすることによって、最終的にどちらのスロットマシンが正しいかを選択する方法である。これはソフトウエアで実装されているが、従来の方法よりも適応性が良いことが示されている。

我々はこれに対し、図 3-1-7 に示すようなレーザカオスの波形を使った意思決定を行っている。先ほどのしきい値をカオス波形に設定して、綱を動かす代わりにしきい値を動かすことを考える。例えばカオス波形の点をサンプルして、しきい値より上だったらスロットマシンＡを選び、下だったらスロットマシンＢを選ぶ。もしスロットマシンＡを選んでそれが当たりであれば、しきい値を少し下げ、逆に外れた場合には、しきい値を上げる。これを行っていって強化学習をし、意思決定を行うということを実装している。

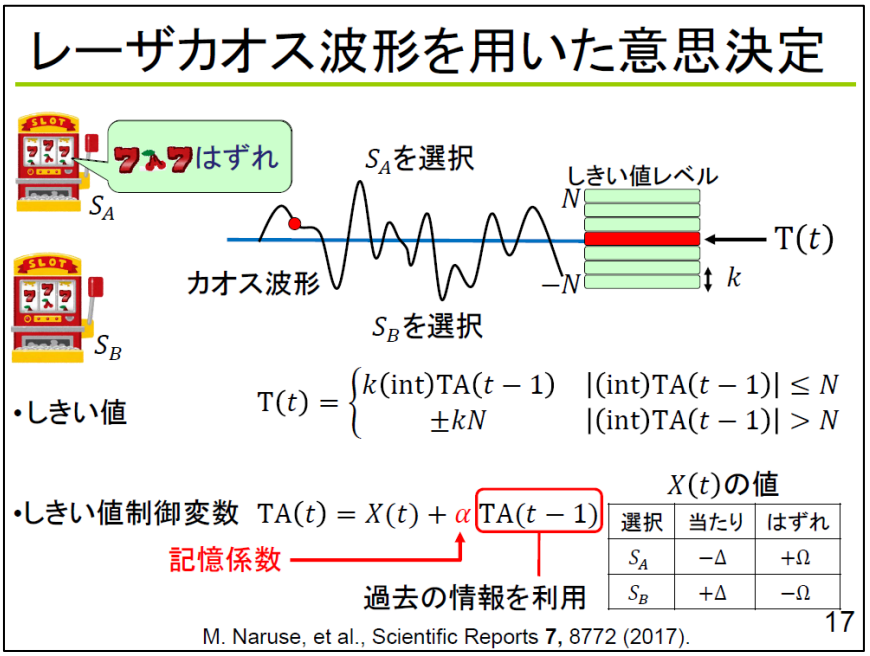


図 3-1-7　レーザを用いた意思決定

結合されたレーザにおいて、遅延カオス同期と呼ばれる現象がある。これは、一方のレーザが少しだけ先行して同期するという現象である。この現象では、結合強度によってどちらのレーザが先行するかが変わってくるので、この現象を使っても意思決定ができる。2つのレーザに対し、先行しているレーザに対応するスロットマシンを選んで、その結果を結合強度にフィードバックさせることにより意思決定を行うという実験も行っている。

最後に複雑系フォトニクスの紹介をする。私は 20 年ほど複雑系フォトニクスという分野の基礎研究を行ってきた。複雑系というのはカオスなど非線形ダイナミクスの分野である。カオスの複雑性とレーザの高速性を組み合わせることで、新しい応用ができないかこれまで研究しており、本が出版されている。様々な応用も大事だと思うが、それの基盤となっているのは、戻り光を有する半導体レーザ技術である。光ディスクや光ファイバの端面から半導体レーザに戻り光があると、ノイズが乗ることは古くから知られており、戻り光誘起雑音と呼ばれている。しかし、これをよく観察して数値モデルを立てると、実は決定論的カオスとして理解すべきことがたくさんある。このような研究をずっと行ってきて、その基礎研究を基に、このような応用がある。

複雑系フォトニクスの方向性を図 3-1-8 に示す。今までは複雑系と呼ばれる分野とフォトニクスの分野がそれぞれあり、我々は複雑系のツールをフォトニクスに応用していた。その逆もあり、様々な光の技術を複雑系における脳のダイナミクスや流体力学の現象を解明することに用いていた。このようにお互いの相互作用（インタラクション）によって、複雑系とフォトニクスの分野で新しい技術が生まれるのではないかと考えている。

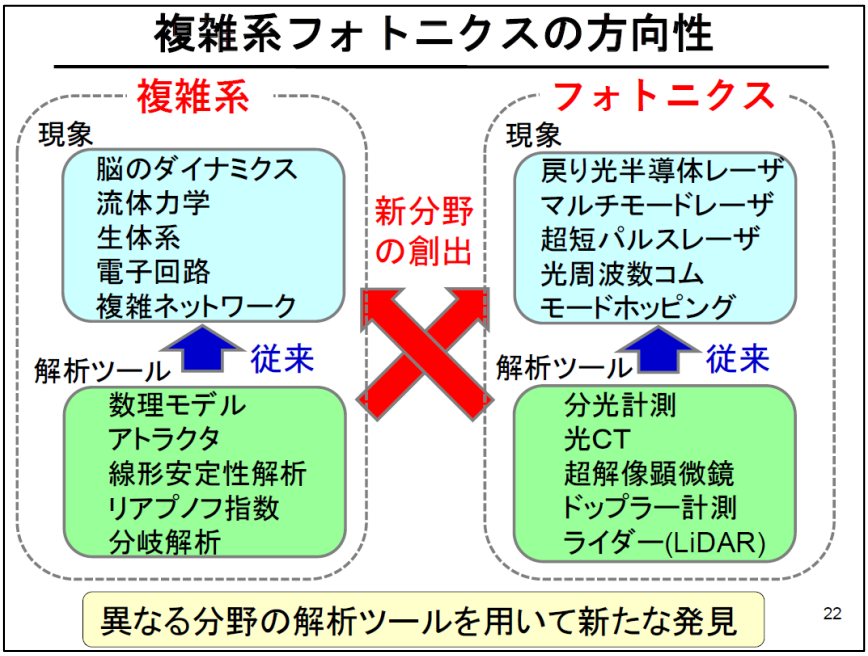


図 3-1-8　複雑系フォトニクスの方向性

【質疑応答】

Q: リザーバーコンピューティングは電子系でもやっていると思う。ニューラルネットワークはセルごとに重みカオスを持っており、それがニューロンでつながっているわけだが、出力の重みだけでできるならうれしいと思う。しかし、そのためには制限も多く出てくるように思う。これは光だけではなく電子系でも同じだと思うが、どのように考えたらよいのか。

A: その通りである。重みをあらかじめ制限してしまうので、ネットワークの構造が決まってきてしまう。このため、やれることは限られるように思われるが、試してみると、ネットワークのノードが非常に多ければ、この重みを変えるだけで様々な条件を表現することができる。元が非常に高次元なので、ネットワーク構造を多少固定してもそれなりの処理はできる。もちろん、従来のディープラーニングほど、汎用性や自由度はない。ある程度ランダムに固定したことによって、様々な高次元空間に持っていけるので、分類や予測の処理はできる。

Q: 光系にこれを適用することのメリットは何か。

A: それは処理速度やエッジコンピューティングへの適用である。処理速度は光アクセラレータとしての意味であるが、もちろん後処理を入れると別の話になる。もし光の計測信号を分析などの処理を行いたい場合に、コンピュータの中でパターンマッチングなどをわざわざやらずに、光デバイスの中である程度処理をしておくことはできる可能性がある。

Q: 光での処理はアナログであるが、ニューラルネットワーク応用では演算精度はそれほど高くなくてもよく、クリアできると思う。しかし、光コンピューティングのときに盛んに言われたように、光は非線形性の弱さゆえにスイッチング機能が弱く、そこが足かせになると思う。電子系と比べて、そこら辺のところはどうなのか。

A: 非線形性に関しては、リザーバーコンピューティングにも様々な種類があり、どのくらいの非線形性が必要かということで選べる。一番簡単なのは、フォトディテクターの飽和による非線形性を使っているものもある。一方では、レーザのダイナミクスを使うような、いわゆ

るレート方程式で記述できるような強い非線形性もある。難しいのは、非線形性と記憶というのは実はトレードオフになっていることにある。記憶は線形の方が残る。非線形性と記憶がどの程度必要かによって調整することは可能と考えている。

Q: ニューラルネットワークと書いてあるのに何か線形回帰問題のような説明になっていた。基本的にはそのような領域での利用ということになるのか。

A: 重みの決め方は線形回帰問題で決める。重みを決めるときに行列だけで計算できるので、リザーバーの中は非線形になっている。

Q: リザーバーの中はある物理現象を選んだら勝手に変えられないが、それでよいのか。

A: その通りである。実は最適化はされていない。そのため、その物理現象がどのような処理に適しているのか逆に探してあげる必要がある。そのマッチングが取れれば効率よくできるが、そうでなければ多少非効率になる。ただし、非効率になっても、リザーバーの次元が非常に高ければ、分類や予測はある程度処理できる。ディープラーニングよりやれることには制限があるかもしれないが、逆に重みの決め方が簡単なので、状態が常に変わっていくような場合、例えば入力データが常に変わっていくような状況では、入力データの変化にすぐ追従して重みを変化できるので、ディープラーニングに比べた利点になる。

Q: 光だと対応できるようなところ、もしくは従来の考え方を合わせることによって新しくできることがあるのではないかという期待もあるが、もしあればコメントいただきたい。

A: 元々ある問題をコンピュータの代わりに光を使って解くというのは、あまりメリットがないと思う。ただし、様々な計測などで得た光信号をどのように分析するかというときに、全てコンピュータにやらせるのではなく、計測したエッジのデバイスである程度の処理をやってコンピュータに送るということにはメリットがある。コンピュータでやると重い処理を前処理しておくのがアクセラレータの考え方になる。

Q: 紹介された北山先生の論文の「光アクセラレータ」という考え方は日本発と思ってもよいか。これまでも様々議論があった中で、そこから全体をまとめる概念として提示されたという位置づけでよいか。

A: 北山先生の論文は APL Photonics に 2019 年 9 月に出ており、「photonic accelerator」という言葉は、この論文が初めてだと思う。特に光コンピュータというとネガティブなイメージを持っている方が多いと思うが、電子とは戦わずに光でできるところは光でやろうということである。FPGA など電子の便利なところを光と融合させることで、光の生き残れる道を探るという意味で、この概念が出ていると理解してほしい。

Q: リザーバーコンピューティングのリザーバーのパターンはあらかじめ設計されていないといけないのか、それともランダムなパターンでよいのか。

A: ここは基本的にはランダムに決めて構わない。物理現象を使うときは、我々は制御できない。しかし、その制御できないものは非常に複雑な出力をたくさん持っているので、その重みだけを線形に和をとることで、入出力関係をうまく学習できる。これがリザーバーコンピューティングの考え方になる。

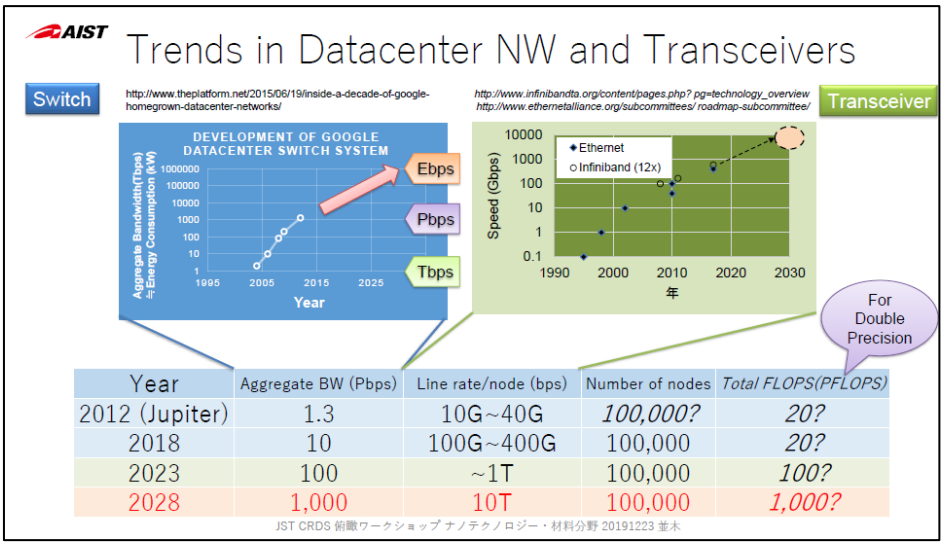
Q: 例えば、リザーバーが多数あって、ゴーストイメージングのように次々に取り替えるとさらに精度が上がる可能性はあるのか。

A: その可能性はあると思う。先ほど紹介したアクセラレータの論文の中にもゴーストイメージングを挙げており、それもアクセラレータとして扱えると思う。

3．2　ポストムーアとフォトニクス

並木　周（産業技術総合研究所）

フォトニクス、特に光スイッチというキーワードでポストムーアに対して、どういう役割を担っていくべきかについての考えを紹介する。10 年程前、公の場においてムーアの法則が終わるかもしれないと言うことにはかなりはばかられる印象があった。実際、ゴードン・ムーアは、「それは CMOS 産業にとってはディザスター以外の何物でもない」というような言を残している。ところがコンピュータアーキテクチャの専門家たちは、これこそが新しい黄金時代の幕開けであると意気込んでいる。大きく見ればゲームチェンジが起こる千載一遇の機会に面しているといえる。一方、彼のベル研には「フォトニクスはシリコンと協業してはならない」という言い伝えがあり、フォトニクスが今後どのような新たな役割を担うのかが不明瞭な状態となっている。そんな中で我々が目をつけたのが、データセンターの動向である。情報量が増えてきて、スパコンと同じ勢いで 10 年以内にはエクサスケールになっていく。



Year	Aggregate BW (Pbps)	Line rate/node (bps)	Number of nodes	*Total FLOPS(PFLOPS)*
2012 (Jupiter)	1.3	10G~40G	*100,000?*	*20?*
2018	10	100G~400G	100,000	*20?*
2023	100	~1T	100,000	*100?*
2028	1,000	10T	100,000	*1,000?*

図 3-2-1　NW とトランシーバのデータセンターに関するトレンド

もちろん、フォトニクスはトランシーバでは揺るぎない役割・貢献を担っており、イーサネットのトレンドが 10 年後まで順調に推移していけば、図 3-2-1 に示すように、数字の上ではエクサスケールを達成することになる。この対応は決して安易ではなく継続的に革新的技術を創出する大きな取り組みが必要である。さらに、トランシーバだけでは自由にデータのやりとりはできないので、スイッチが必要になる。現在はチップ単体で 12.8Tbps のスループットを有するものが商用化されているが、スイッチの容量が増えていくと消費電力が上がるため、冷却限界の目安とされる 300Wを超えてしまい、その持続発展性が大きな懸念事項となっている。このような見通しは容易に予想でき、我々も 10 年程前からスイッチを電気から光に置き換えるためにシリコンフォトニクスに注目し、世界的にも早い段階で大規模な光スイッチ開発に取り組んできた。近年、外部制御可能なシステムレベルで、5μs の切り替え時間を 32x32 スイッチチップで 2W 程度の消費電力で実現できる目途がついている。損失やクロストークについてもかなり良好な見通しが立ってきており、損失では実測レベルで平均 10dB ぐらいのものができ、8x8 スイッチでは 9 段

程度の縦列接続でも良好なクロストーク特性が得られている。今後、数 dB は改善する見込みがあるため、大規模なシステム的にも使える領域になってきている。

データセンターのネットワーク容量を従来技術の延長のままエクサスケールまで増設したときの電力を予測すると（図 3-2-2）、現在のスイッチ部分の電力はそれほど多くないが、今後は爆発的に増大して持続性のないものになるという悲観的な見通しとなる。この大部分を上記のような光スイッチで置き換えることができれば、エクサスケールの情報のやりとりも現在と同等の電力消費の範囲で実現できることになる。これは電子デバイスでは絶対にできない光の潜在能力といえる。ならばすぐにでも置き換えればよいという話になるが、全然そうならない。なぜなら、エレクトロニクスのスイッチはパケットベースのスイッチであり、光は経路ベースの回線交換なので、システム上は水と油のような関係とも言え、そのまま入れ替えてもシステムが動作しない。

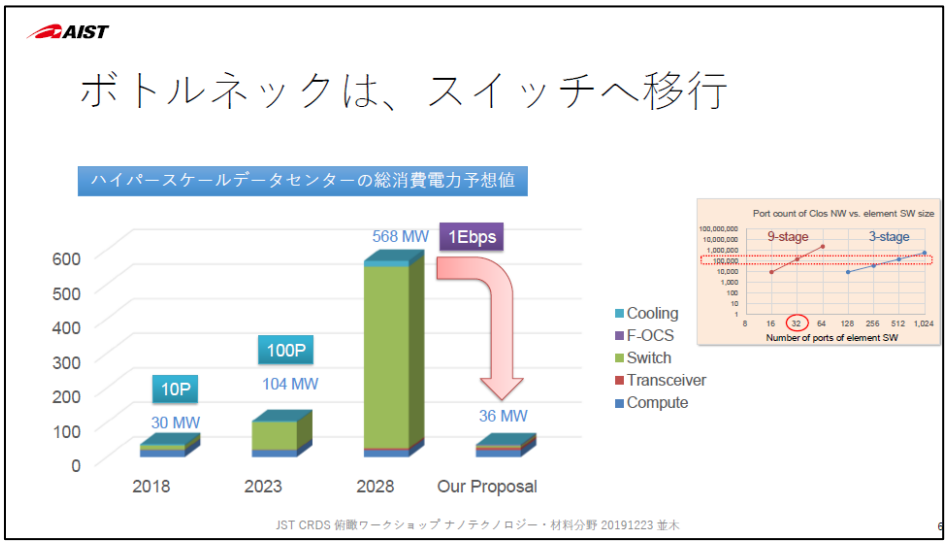


図 3-2-2　ボトルネックは、スイッチへ移行

今日の情報処理インフラでは、エレクトロニクスが様々なデータを細かい粒度の小さいデータブロックに分けて、それをバケツリレーのように右から左にローカルで処理しており、大局的に何が起こっているかはわからないアーキテクチャとなっている。情報がモジュール化されオブジェクト化された環境によって全てが成り立っている。ここに光の物理的経路だけが動くようなものが入ってきても、システムの前提条件に不整合が生じてしまい、そのままでは共存しない。光の潜在性を活かそうとするならば、エレクトロニクスが支配するアーキテクチャ、ソフトウエアのつくり方そのものを抜本的に見直し、物理的な接続経路をシステム全体としてうまく活用できるようなものを生み出し、物理的デバイスとソフトウエアが協業する新しい流れをつくる必要があると考えている。

コンピューティングというのは、計算するエンジンとそのもととなるデータを保管するためのメモリやストレージ、そしてこれらの間でデータをやり取りするためのネットワーク（トランシーバとスイッチ）によってトータルなシステムが構成されるアーキテクチャと見ることができる。ムーアの法則に支配される状況では、黙っていてもそれぞれのエレメントが進化を遂げ、アーキテクチャは普遍のままで、あたかも打ち出の小槌のようにシステムの性能が向上し次々にさまざまな革新が起きるというビジネスモデルだった。

それぞれのエレメントがムーアの法則の終焉によってもはや従来のようにスケールしないとなると、新しい革新的技術を導入する必要が出てくる。ここにフォトニクスを使うことで、従来システムに異種・異質なものが入ってくるならば、これを活用する形にアーキテクチャまでも抜本的に見直していく必要がある（図 3-2-3）。トランシーバには既に光が入っているが、計算エンジン、メモリやスイッチはどう変わるであろうか。フォトニクスに限らず量子やニューロモルフィックといった、異種異形の物理的要素が混在していくのがポストムーアであると捉えるとすると、このような環境をどうやって全体として回していくかというところに、焦点が移っていくのではないか。

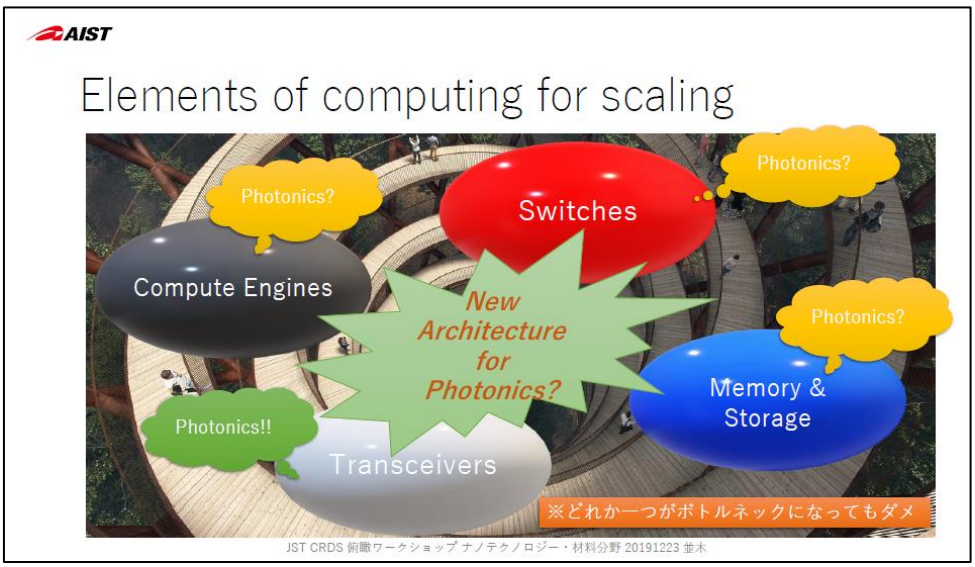


図 3-2-3　スケーリングのためのコンピュータのエレメント

図 3-2-3 にあるエレメントを個別にみていく。まず、従来計算エンジンの主役であった CPU は今後スケーリングしない。それでも計算・システムの能力を向上させようとするならば、CPU が汎用性のためにとってきた無駄を省いていかなければならない。無駄というのは目的・アプリケーションを決めなければ定義できないので、必然的にその目的に最適化された様々な専用マシンを開発していくことになる。一方、専用マシンを開発すると汎用性が失われるため、汎用性をシステムとして維持するためにリコンフィギュレーションや、目的別のディスアグリゲーションなどをプラットフォーム化させていく必要があり、そこではネットワークの重要性が今まで以上に増していくことになる。

インテルの CPU に対して GPU や TPU を見てみると、10 倍～100 倍の計算能力が既に達成され商用化されており、これを多様化していくのが今の流れになっている。機械学習などのアプリケーションがうまくマッチングして、いい形で流れができつつある。例えば、DARPA はその汎用化の一形態としてチップレットという概念を提案し主導している。それを製品プラットフォームに移植する動きがすでに AMD などに見て取れる。さらにこの流れでは、チップ間インターコネクトが重要になるが、HP が主導して Gen-Z Consortium というコンソーシアムを立ち上げ、標準化活動が進んでいる。ソフトウエア側も、ハードウエアに対して開発環境を整えてきており、OpenCL というソフトウエアの API（プラットフォーム化されたライブラリー）を一通り揃える

動きが活発になってきている。最近、インテルがそれを商用ベースで利用できる oneAPI という開発環境を提供すると発表して話題になった。こういった環境が整っていくと、光アクセラレータのような概念や専用マシン、あるいは異質なものが入り易くなっていくだろう。新しい専用計算エンジンを開発したら、そこにどう載るか考えていけばよくなる。

ただし、量子や光ニューラルネットワークなどは、実用に堪えうるスケーラビリティやベンチマーキングをある程度定量的におこない、継続的に時間をかけて意味があるものをじっくり推進していくべきだろう。強力な革新的チップができると、それをどう取り込んでシステム全体で使い易い環境にしていくかをシステム・アーキテクチャと一緒に考えていく流れになる。

メモリに関しては現在、3 次元積層による HBM が量産体制に入ったのでしばらくはスケールする見通しがある。さらに、ストレージクラスメモリが今まで懸案だったが、インテル®が Optane™ メモリを製品化し徐々に普及し始めている。

ネットワークのトランシーバについては、電力はそのままで通信容量が増大し、電力効率はムーアの法則と同様に向上している。一方でスイッチチップは電力が増大している。

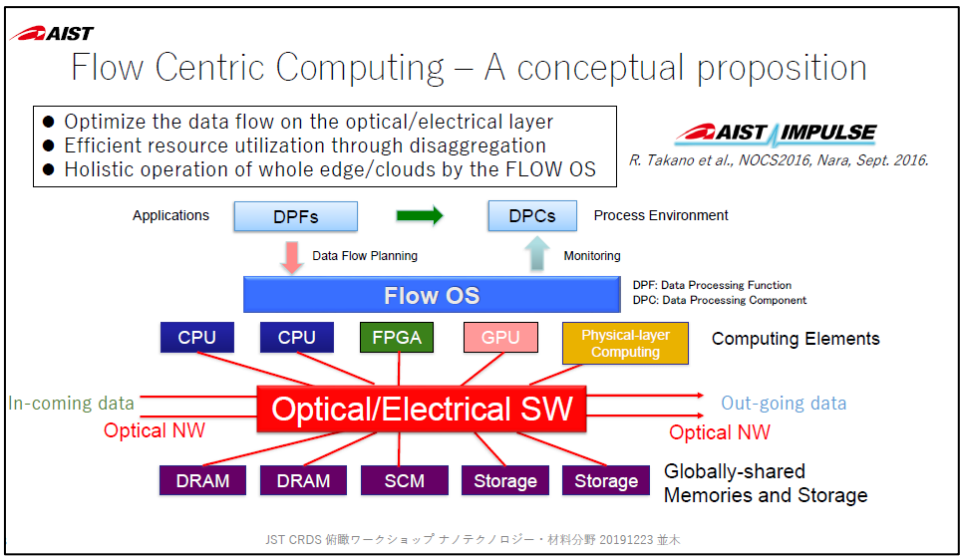


図 3-2-4　フローセントリックコンピューティングのコンセプト

この傾向が続き、DRAM の電力効率（～10pJ/bit）を割るような超大容量光ネットワーク技術が開発されると、DRAM で扱っていたようなマルチテラビット級の計算内部でのデータもトランシーバを介して扱うことができ、距離の制約を受けなくなることで、コンピュータシステムの最適設計の重心が移動することになる。これは非常に大きなインパクトになるので、フォトニクスでここをブレークしていきたい。計算をヘテロジニアス（異種）なコンピューティングに分割（ディスアグリゲーション）して、異種メモリを多階層化によりスケールしてシステム全体の計算能力を高めていくポストムーアでは、ネットワークのスイッチ部分が従来以上に深刻且つ究極のボトルネックになっていく。それを光スイッチで解決することが我々の命題になってくる。上述の通り電気スイッチベースのインターコネクトを異種計算プラットフォームとするコンソーシアムが北米を中心に立ち上がっており、世界的な潮流が形成されてきている。ここに光をどう移植・活用するかを考えるのが、フォトニクスで優位に立つ日本の喫緊の課題である。我々はこの潮流

ができる以前から図 3-2-4 に示すように、データが流れ込んできてリアルタイムで計算処理して出していく、というコンセプトを提唱してきた。そこで光スイッチと電気スイッチをうまく活用するためには、データの流れを上位レイヤーが知る必要がある。非常に大きなデータフローは光スイッチに任せ、細かいものは電気スイッチに任せていくことが考えられる。

Optane™の量産普及に伴い、コンピュータアーキテクチャの中では異種メモリを使いこなす技術が蓄積されていくだろう。我々は、そこに光スイッチの技術をマッピングできないか着目している。メモリも光スイッチも同じように容量とスイッチスピードにトレードオフがあるため、異種メモリを活用する技術と異種スイッチを活用する技術には多くの共通点が存在するはずである。ソフトウエアの工夫によってシステム全体として無駄なく効率の良いものが構築できると期待している。ハードウエアとして、シリコンフォトニクスによる集積技術が様々な部分で重要性を増している。我々は大規模光スイッチ開発において、シリコンフォトニクスを早期から開発し先行していたので、世界的にも高い評価をもらっている。現在、産総研のシリコンフォトニクスの技術を、R&D ファブとして、国内の研究機関に開放する活動をしている。実際に、MPW（マルチプロジェクトウェハ）サービスを開始し、第 1 回が完了したところであり、評価していただいている。

まとめを図 3-2-5 に示す。ポストムーアにおけるフォトニクスの役割は、大容量のデータをやりとりするプラットフォームを形成していくことである。それにはシリコンフォトニクスのような集積化技術が非常に重要であり、継続的な取り組みが重要となる。また、ソフトウエアとの連携が重要であり、システム・アーキテクチャの中でフォトニクスの癖を理解してシステムを作る、及び、その逆の双方の活動が必要である。そのためには、高リスク研究への低リスク環境を実現する必要があり、ハードウエア・ソフトウエア交流の場、拠点構築、エコシステム形成が重要となる。

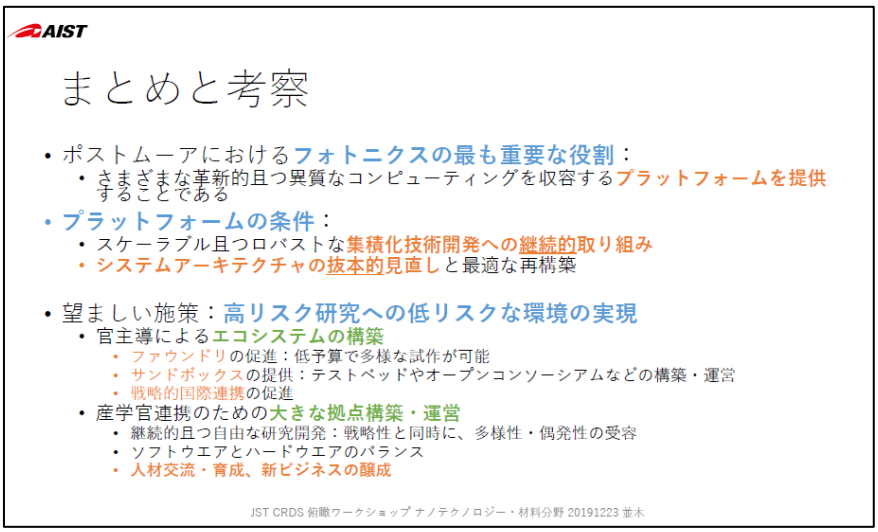


図 3-2-5　まとめと考察

【質疑応答】

Q: 遅くてもよいメモリは、大容量であることが必要だと思うが、1μs ぐらいで動く相変化メモ

リを、電気ではなく光でつなぐほうが良い理由があるのか。

A: 計算エンジンとデータのやりとりをするときに、光スイッチをうまく連携させていけば無駄がなくて良い。光が与える価値は距離である。ストレージクラスメモリがスケールアップしていくと、ボードからはみ出してラックになったり、ラックをはみ出してマルチラックになったりするので、距離が重要になってくる。それをリコンフィギュアするときにスイッチが必要になる。光スイッチはレイテンシが相変化メモリと同程度で、電力効率は電気スイッチに比べ 3 桁程度良い。

Q: 電力効率が 3 桁程度良いというのは、技術的には何が元になっているのか。

A: 基本的に光スイッチは、通過する光に入っている情報量とは関係なく、光の物理的な光路を切り替えることができれば良いので、必要なエネルギーはマッハ・ツェンダーの消費エネルギーだけで済む。その光路が数テラヘルツの帯域があり、数テラビット／秒の信号を、その電力で切り替えることが可能になる。これは単純計算で 3 桁程度の低電力化になる。電気スイッチの場合は、ビットごとに個々のトランジスタをスイッチングしていくため、当然そのビット数に比例して電力が必要になる。したがって、帯域が増えデータの容量が大きくなればなるほど、光スイッチは圧倒的に有利になる。

Q: コンピュータアーキテクチャを変革しようという大胆な話だと思う。一つのグループだけではできないと思われるが、世界的な動きはどうか。日本が取り組んだときに、ゲームチェンジャーになり得るのか。

A: 光スイッチをここまで大胆に使うと言っているのは我々くらいだが、コンピュータに詳しいエンジニアは光のことは全然わかっていない。また、デバイスのエンジニアはコンピュータのことを全然わかっていない。いつまでたっても接点がないという状態がいまだに続いている。電気スイッチだけではムーアの法則の限界を回避することはできず、ヘテロになればなるほどスイッチへの負担は増す。そのパラドックスについてはまだ誰も声を大にしていないので、我々はまずやって見せることが大事だと考えている。光スイッチを現行のシステム・アーキテクチャの枠内で活用しようという活動は、IBM 研究所、Huawei Canda、Lawrence Berkeley National Laboratory や Columbia 大などが行っている。DARPA の PIPES プロジェクトや ARPA-e の Enlitened プロジェクトなどはこれらを推進している。

３．３　コンピューティング技術を活用した光デバイス設計と展望

橋本　俊和（NTT 先端集積デバイス研）

タイトルのとおりに話せるかどうかわからないが、個人的な意見も交えて紹介したい。私は、もともと光導波路の設計に関する研究開発をやっていたので、まずそのバックグラウンドを少し紹介する。NTT では当時、光ファイバーと交換器向けに LSI の研究などもやっていた関係で、これらの技術を組み合わせて光で回路を作ろうということになった。図 3-3-1 にあるように、シリコン上の厚いガラス膜の中に、屈折率の高いところと低いところを形成すると平面光波回路が得られる。この平面光波回路は、基本的には通信向けで、コアネットワークでは波長多重通信用プリズムのようなデバイス、アクセスネットワークでは光を分けるための基本的デバイスとして使われている。

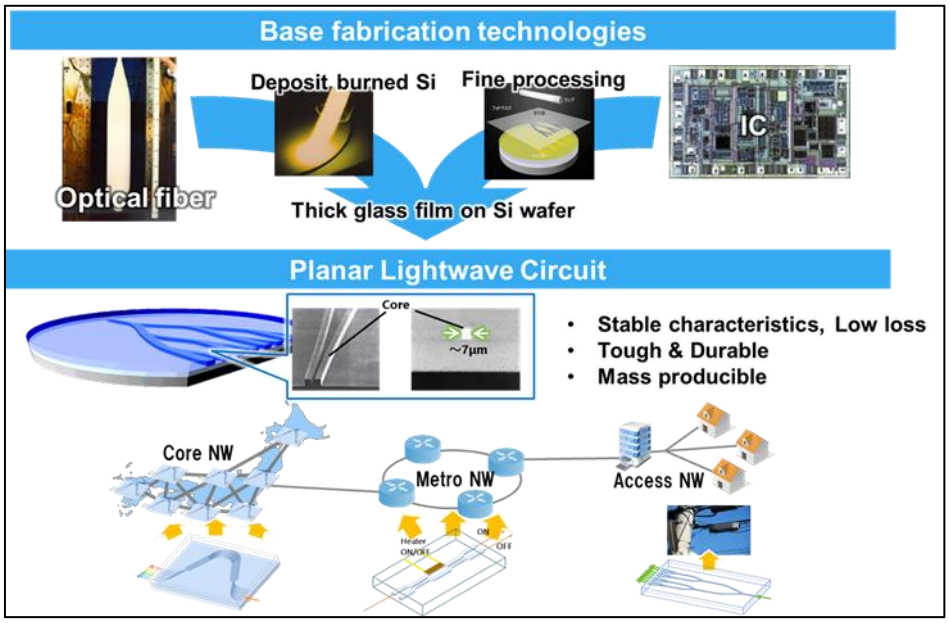


図 3-3-1　平面光波回路（PLC）の概要

通信向けの光技術、特にパッシブ部品の技術は成熟していると言われているが、私は平面光波回路を使った研究を最近でも行っている。平面光波回路の他の応用について図 3-3-2 に示す。WSS と呼ばれる光フィルター回路において、投影先は LCOS で導波路とは関係ないが、ビーム形成を担う導波路フロントエンドに機能を付加でき、例えば１万チャネル規模を有する光の可変フィルターができている。また、最近、可視光レーザーも様々なところで作れるようになりコストが下がってきたことで、複数のレーザーを束ねて白色光源が作れる光回路も研究している。量子向けにも光量子であるフォトンの干渉効果による処理が重要となってくるので、そのような干渉回路を集積した光量子情報処理向けの光回路も作っている。さらに、コンピュータを使って光回路を設計するというような研究も行っている。以上の研究で使っているのはガラスの回路で単なるパッシブ部品であるが、信号（情報）と結びつくことで、その強さが発揮される。実際、典型的な例として光ファイバー通信があり、複雑な変調信号に対応した復調回路等が光回路によって実現されている。

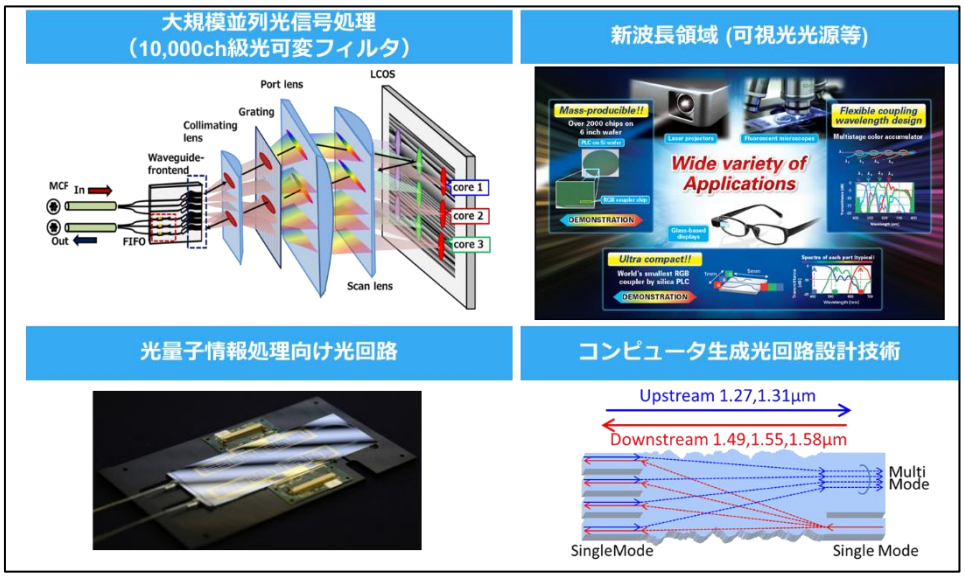


図 3-3-2　PLC の通信以外の応用

以上のことを背景に、コンピューティング技術と光デバイス設計について紹介する。まず、コンピューティングのどこが光と関係するか、イメージングを例に考えてみる。この例では Coded aperture を使いイメージを最終的にデジタル処理するのだが、aperture の形により様々な情報を取り出せる。このようなイメージング技術は、光で計算機に適したデータを生み出し、光で計算をしているように見えるし、逆に、あるべき Coded aperture を出す光回路の計算も行われている。以下ではその例を詳細に見ていく。

一つ目は光でデータを生成するという光メタサーフェスである。NTT では誘電体を使った光メタサーフェスを研究している。この場合の光メタサーフェスは透過型のデバイスで、一般に屈折率差の高い層や構造物があると界面で反射が起こる。インピーダンス整合というのは、光メタサーフェスの構造をうまく設計すると、構造由来の透過率と透磁率を制御でき、基板に対して屈折率差の高い構造体でも、反射が起こらない回路を作れるという意味である。さらにサブ波長サイズの構造体であり、異方性も持たせられるので、そういった回路の設計技術により、偏波分離器や波長分離器、高い NA のレンズが実現できる。コンピューティングの観点から見ると、この研究で使っているのはサブ波長レベルの構造体で、膨大な自由度があり（人手では扱うことは無理なので）、その活用に必要な設計技術や計算機と組み合わせることを前提とした光情報処理を考えなくてはいけない。

二つ目は、光で計算する例として、光リザーバコンピューティングを挙げる。図 3-3-3 に光導波路技術を使った NTT の研究の例を示す。導波路の部分、例えば先ほどのリングに入力した多数のパルス同士で相関を作り、その相関関数をリングを周回させ、最後に、そこから取り出した光パルス列を線形フィルターで適当に重みづけして足し合わせる。最初のパルスを作る入力層は光回路を使ったランダムパターンである。最新のニューラルネットワークの認識では正答率がほぼ 100%であるが、本手法では手書きの数字でも 90%を超える正答率が出る。これは 500 ノード（500 ニューロン）程度の回路なので、規模としてはそれほど大きくはない。

この規模を大きくするためには、パルスをできる限り多く入力させることが重要であるが、光の広い帯域を利用して信号を細かく組み合わせることで、非常に高い周波数が実現できる。ここ

は光が優れている点だと思う。一方で、意味のある情報を電気信号として取り出すために、FPGA等との連携も必要で、電気の情報処理と組み合わせることで、今後非常に期待が持たれる技術であると思われる。

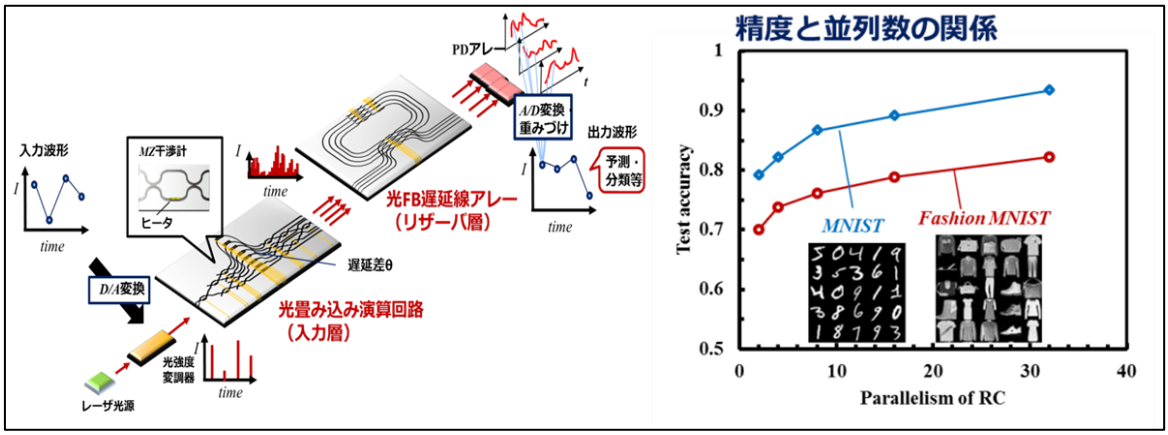


図 3-3-3　光導波路技術を使ったリザーバコンピューティングの例

三つ目の例は、光だけでニューラルネットワークを作る研究であり、ここでは入力光をパターニングした位相板で広げることによってネットワークをつくる。計算自体は将来的にアクティブにできるのかもしれないが、今は計算機で位相の重みを計算することで、数字や文字を認識できている。この技術も非常に高い自由度があり、計算機によりその位相重みを計算している点ではコンピューティングと大きく関わっている。

この例と類似しているのが四つ目の例である。Nokia Bell 研究所が行っている研究で、1 枚の位相板を使った多重反射により様々なパターンを生成するものである。光通信で使われるマルチモードの伝送技術用フィルターを作り、空間を飛ばした光をマルチモードファイバーで受け、分離するというプロセスで最後は計算機で計算を行う。この例も先の例と同様に基本的には莫大な自由度を計算機で位相重みをつけて計算している。

以上、コンピューティングと光との関係を、イメージングを例にとってまとめると、図 3-3-4 のようになる。デジタルで必ずやる部分とアナログで物理実装されている何かがあり、それで一つのシステムをつくっている。光アクセラレータという考え方と同様に、私もデジタルを前提とした光信号処理を考えるべきではないかと思う。アナログだけでは不十分なところをデジタルで補完することを、光と電気を組み合わせるという意味で、光電子融合と呼んでいる。この光電子融合を一気通貫で設計していくことが重要と思っている。

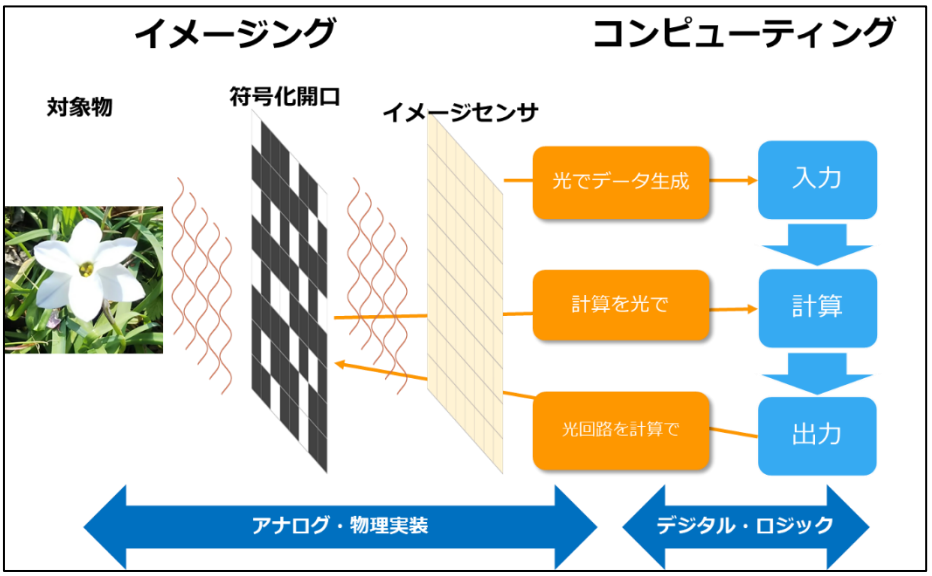


図 3-3-4　光とコンピューティングの関係に関するまとめ

次に、波面整合法という方法を紹介する。光部品は高精度な加工により作られる場合が多く、そうするとその精度の分だけ光部品のパラメータを変更できるともいえるので、非常に大きな自由度があると考えることができる。その場合、設計するにしてもどう作っていいのかわからない場合が多々あり、そのときの一つのやり方として光で光回路をつくるという方法がある。これは、光の強度が高いほど屈折率が高くなるため、屈折率が高いところに光は集まりやすいという性質を利用している。例えば、高屈折率のフォトリフラクティブ材料に両側から光を入力すると、自動的に光導波路ができるというもので自己形成導波路と呼ばれている。

波面整合法では同じことを、実際の物質でなく数値計算上で行う。ただし、光強度に応じて屈折率を変化させるのでなく、順方向に伝搬させた光と逆方向から逆伝搬させた光の位相差に応じて屈折率を変えてやる。そうすることで、様々な光回路ができる。

実際の光回路の例としては、光導波路の交差導波路の損失を減らしたり、マルチモード干渉を用いた波長フィルターにより波長帯域を広げたり、アレイ導波路格子（AWG）と呼ばれるプリズムのような回路の損失を減らしたりするものがある。さらに、上りと下りで波長が違う光加入者用ネットワーク（PON）向けマルチモードカプラの例もある。下りはシングルモード、上りはディテクターで受ければいいのでマルチモードで良いが、双方向でシングルモード回路とマルチモード回路が入り混じった光回路という人間ではできない設計を行っている。

波面整合法のアルゴリズムをもう少し詳細に説明する。図 3-3-5 に示すように、入口側から伝搬させた光と出口側から逆伝搬させた光を数値計算により求め、それらの位相差を評価して位相が合うように屈折率分布を変更するというものである。これをもう少しミクロに見ると、ホイヘンスの原理で光が広がっていくので、ニューラルネットワークと同様に、光を広げることによりネットワークが構成され、位相重みを最適化するという、まさにニューラルネットワークと同じ設計論になっている。実際、上記の位相が合うように屈折率分布を変更するという手法は、図 3-3-5 の右側のニューラルネットワークでよく知られた誤差逆伝搬法に対応していることが示されている。このことからもわかるように、光と情報がうまく結びついて、情報処理と光による信号処理と光回路が一体となって、新たな技術やいままでできなかったことを実現する世界観ができるの

ではないかと考えている。

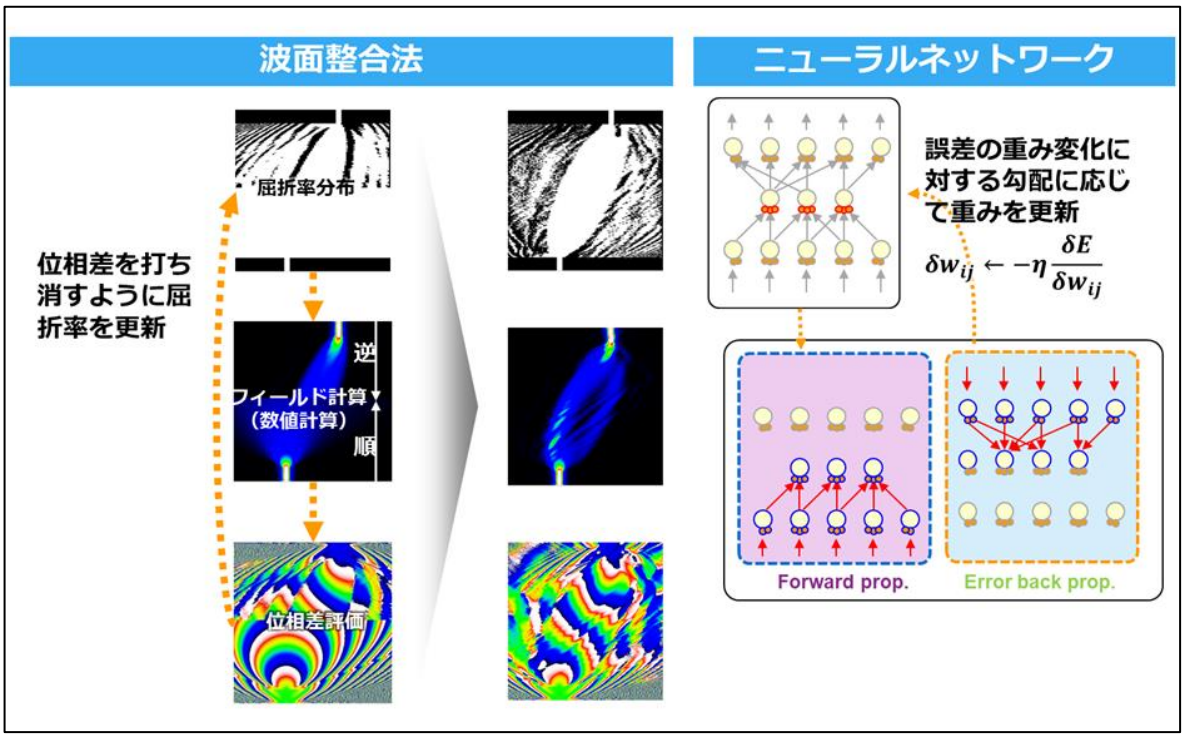


図 3-3-5　波面整合法のアルゴリズム

以上、波面整合法の光電子融合設計的な側面をまとめる。光回路の非常に高い自由度を扱える技術であることと、入出力を自由に設定できることが重要である。ここでは、人間が理解している必要はなく、電子回路などと組み合わせ機械やセンサーに都合が良いものを選べばよい。例えば、昔はスペックルノイズと言われていたようなものが今は干渉情報として扱えるので、うまく使えば超アナログ計算機としても使えると考えられる。

【質疑応答】

Q: 後半の話では、光の位相を合わせるようにコンピュータ上で屈折率を変える、あるいは構造を変えるのか。

A: 光の屈折率を自身で変えるフォトリフラクティブ材料と同じことを計算機でやってもいいと考えたが、実際にやってみると光の強度もとに屈折率を変えた場合は変化が激し過ぎ計算が安定しなかった。そこで、位相で試したところ非常に安定した計算ができ、光回路ができたということである。

Q: この位相を合わせるようなコンピュータ上のやり方と、ニューラルネットワークは非常に類似性が高いので、両方向に使えるということか。

A: そのように考えている。光回路の設計だけに限れば、この手法に限らず、20 年ほど研究されているトポロジー最適化という方法もあり、最近では三菱電機がこういったパターンをニューラルネットワークで決定するという提案を行っており、様々な方法があると思う。さらに、

光回路が有する高い自由度をうまく使ってやると、いままで人間の都合で決めていた（人間が理解しやすい電磁界分布等であたえていた）入出力も、もしかしたら計算機に都合がよいように決めて、計算機に回路設計をさせることで、これまでにないものを実現できる可能性もあるのではないかと考えている。

Q: 最近だと、市販されている COMSOL の中に自動最適化プログラムが入っていて、研究の内容と類似の機能をお金で買える時代になってきている。その中で独自性を強調するためのポイントはどこなのか。

A: 光の高い自由度をいかに制御するかがポイントと考えている。自由度が高ければ幾らでも目的の設計に合わせられるが、ニューラルネットワークと同様に過学習あるいは過剰適合ということが起こる。それをどうやって制御するのか、どのような意味づけで制御するのかが重要である。また、できた光回路を人間がどう理解しチェックするかという、機械学習と似た問題も考えなければならない。制限のかけやすさ、理解のしやすさという観点では、少し物理寄りの波の位相を合わせる本手法はシンプルで、よりわかりやすい回路、人間が見て安心できる回路をつくりやすい手法となる可能性がある。

Q: この発表のまえに光アクセラレータという提案があり、その中では何でも光でやろうとせず、もっとばっさり割り切ってしまった方がいいのではないかという話があったと思う。発表では光電子融合といっているが光と電子の役割の切分けはどう考えているのか。

A: 役割としては、ばっさりと切るのだと思う。ただし、それぞれの役割に対して何を期待するかということは、人間が知っている場合もあるが、実際のコンピューティングのシステム全体の中ではわからない部分もあり、前段と後段のような分け方が適切でない場合もあると思う。例えば、図 3-3-4 の符号化開口を例に考えると、開口の形をどうするか計算しないといけないが、それは人間には困難で、そこは計算機がやるべきだが、そう考えると、光の処理と電気の処理が入り混じった融合した処理になっているとみなせると思う。このように、実際のシステムとして見たときに、確かに役割は分けるが情報の受け渡しをするというよりは一つの情報処理の中でばっさり役割分担をしてその工程を行うイメージである。

4．イメージング・計測技術

4．1　Si フォトニクスによるソリッドステートライダー開発

馬場　俊彦（横浜国立大学）

日本語で「光レーダー」などと称されることもある LiDAR（Light Detection And Ranging）は、偏向させて出射したレーザビームの反射光により、各点までの距離測定を繰り返し、3 次元イメージングを行う装置である。LiDAR を特徴づける技術的なポイントとして、図 4-1-1 に示すように「どのようにして測距をするか」、「どのようにビームを偏向するか」の 2 つがある。測距方法にいては、パルス時間を計測する Time of Flight（TOF）が主流である。これは、パルスを送って、反射光が戻ってくるまでの時間を測ることにより距離に換算するもので、光学系構成が簡単なため、多くの LiDAR で採用されている。ただし、遠方に届くまでの間に光は広がり、その一部だけが反射されてくるため、戻ってきた光パルス強度はかなり弱く、高感度を得るためには強いパルスが必要となる。このため、光源の高強度化が容易な 1 μm 以下の波長帯が良く使われる。

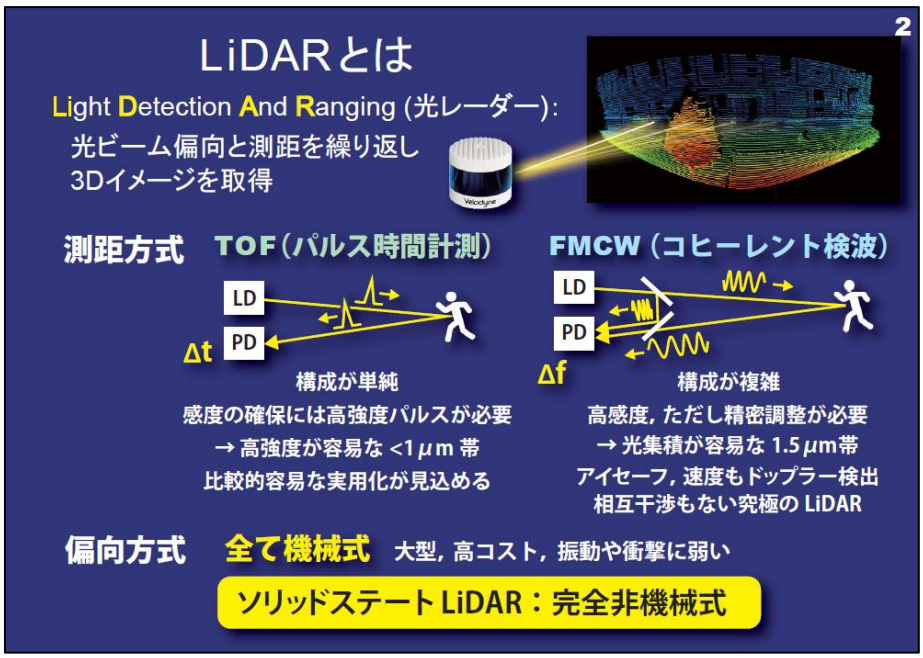


図 4-1-1　LiDAR とは

一方、ミリ波レーダーなどでよく使われている FMCW（Frequency Modulated Continuous Wave）方式を用いた LiDAR もある。この方式は、パルスでなく連続波を用いるが、連続波の周波数を時間的に徐々に変化させているのが特徴である。物体から反射した光と内部に一部残した出射光を干渉させると、反射光が帰ってくるまでの時間差に応じた周波数差によりビートが生じる。このビート周波数を測ることで対象までの距離を得ることができる。この構成の LiDAR をバルク部品で作ろうとすると、(光の変調／干渉部分の) 構造が結構複雑になるという欠点もあるが、コヒーレント検波を使っているため非常に高感度にすることができる。最近では、光学部品

の精密調整を避けるために、光集積が簡単な 1.5 μm 帯でシリコンフォトニクスを使って構成した例が多く報告されている。 この波長帯はアイセーフ（目に優しい）であること、この周波数がドップラーシフトを含むため速度の計測も可能であること、アンビエント光、すなわち太陽光や他の LiDAR からの光、に対する耐性が非常に高く余計な干渉がないこと、などの点から究極の LiDAR と考えられている。

光のビームを偏向する技術に関しては、現行の方式はすべて機械式と言ってよい。LiDAR 自体を回転させるか、回転式のミラーを使うかの方式の差はあるが、いずれにせよ何らかの機構を使ってビームを走査しているため、これが大型化、高コスト化、振動・衝撃耐性の低下の原因となる。これを完全になくしてしまうソリッドステート型が、最近の開発の中心的ターゲットとなっている。

LiDAR の応用先は、近距離用から遠距離用まで幅広く、すでに、ロボット・車の自動運転から測量・災害監視に至るまでの様々な用途に使われている。また、近年、iPhone に顔認証が搭載されたことに代表されるように、3 次元画像を取得してそのデータを活用することに注目が集まって来たことから、想定される LiDAR の用途がさらに広がっていく傾向にある。このため、世界中で、とりわけアメリカでは、LiDAR を開発製造販売する会社が増え、ベンチャーを含めると 40 社以上となっている。

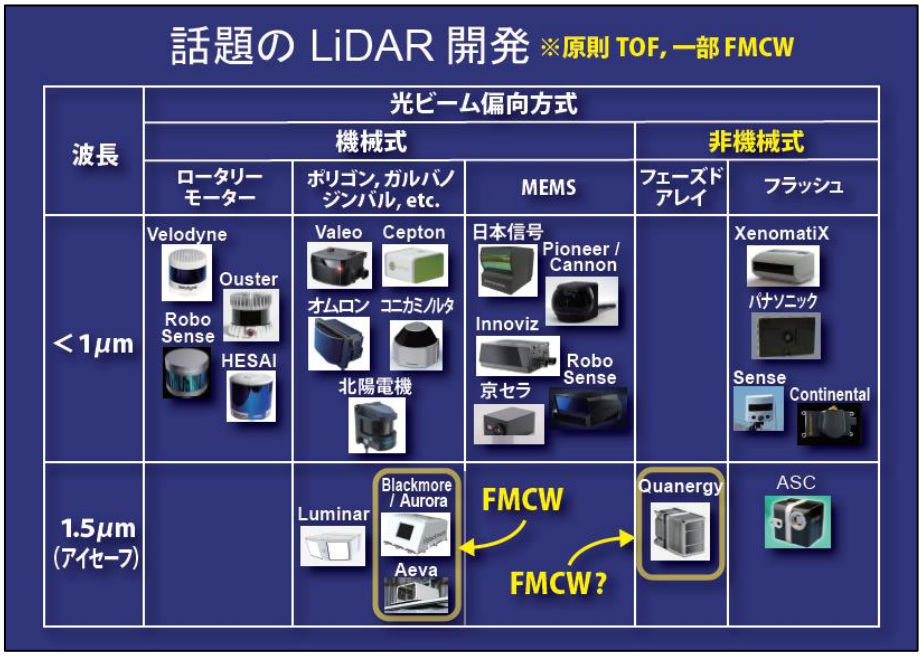


図 4-1-2　最近の LiDAR 開発

図 4-1-2 にそれらの中の一部を示す。測距方式は、ほとんどの LiDAR が TOF であり、偏光方式は大部分が機械式を採用している。LiDAR 全体をモータで回転させる方式、回転するミラーを用いる方式のほかに、量産性、アセンブルコストの課題解消のため、MEMS を採用した方式なども試みられている。レーザ波長としては、多くが 1 μm 以下、特に太陽光の干渉が少ない 940 nm が用いられているが、アイセーフな 1.5 μm 帯を用いるメーカーも一部ある。また、1.5 μm 帯を

採用する製品の中には測距に FMCW を用いたものも実用化されてきている。一方で、図右側の非機械式偏向法は、現在、開発競争が激しい分野である。ソリッドステート（=非機械式）のメリットは、小さい、可動部品がないため高速、半導体技術で作れるので低コスト、可動部がないため振動衝撃に強いなどの利点が期待されるからである。最終的に自動車に載せられようになるには、装置 1 個あたり 1 万円以下の出荷価格が求められるが、実用性能を満たしたうえでそのような価格で量産できている LiDAR は現状では存在しない。

一番有名な Velodyne の LiDAR は車の上にパトカーのサイレンのような形で載っているものだが、現在の販売価格は 500 万円ということであり、1 万円を切るというレベルにはほど遠い。これに対して、すでに車載に LiDAR が使われ始めている例もある。例えば、アウディのハイエンドモデルにおいて、出荷価格 5 万円で Veleo という会社の LiDAR が納められている。業界に大きなインパクトを与えたものの、この LiDAR は実際に使い物になるレベルのものではないという評価であり、実用性のある車載 LiDAR まではかなりな距離があると考えている。

ソリッドステート LiDAR は小さく軽く安価なために、車に必要な数だけ搭載することもでき、ビーム走査に慣性抵抗がないため自由にビームを偏向できるなど、機械式では得にくい多くの特徴が得られる。もし、既存の機械式 LiDAR と互換性があれば部分的に置き換えていくといった段階的普及も起こりうると考えている。

図 4-1-3　ソリッドステート LiDAR の例

図 4-1-3 に示すように、アメリカでは、非常に積極的にソリッドステート型の研究が進められている。Quanergy という会社が、CEATEC に実際に製品を展示したり、コロンビア大発ベンチャーの Voyant Photonics が指先に載る LiDAR などを発表していたりと、動きが活発である。中でも、MIT 初の Analog Photonics 社の LiDAR は、光フェーズドアレイを用いてビームを自在に振って 100×100 の解像点を実証している。これは、現在最高性能の光フェーズドアレイだと

考えられる。

Si LC Vision は光を偏向する部分以外をすべて on chip 化することを目指している。FMCW 方式を on chip にするということは、連続波の非常にコヒーレンシーの高いレーザに、何らかの周波数変調を与えてから光ビーム偏向器を介して出射して、戻ってきた光を参照光とミキシングして受光器に入れるということになる。これをシリコンフォトニクスによって実現することになるが、シリコンには二光子吸収があるため、TOF 方式のような非常に強いパルスを出す方式には向かない。そのような強いパルスは、導波路で吸収されてしまって、素子が破壊されることになるからである。シリコンフォトニクスで集積化するには FMCW 方式のほうが向いているということになる。また、アイセーフ波長だということで、結構強い連続光を空間に放射しても許されるのも FMCW の利点である。コヒーレント検波で高感度、距離と速度を計測可能、これらを全部シリフォトでつくれるというすべての点で、シリコンフォトニクスと FMCW は相性が良いといえる。

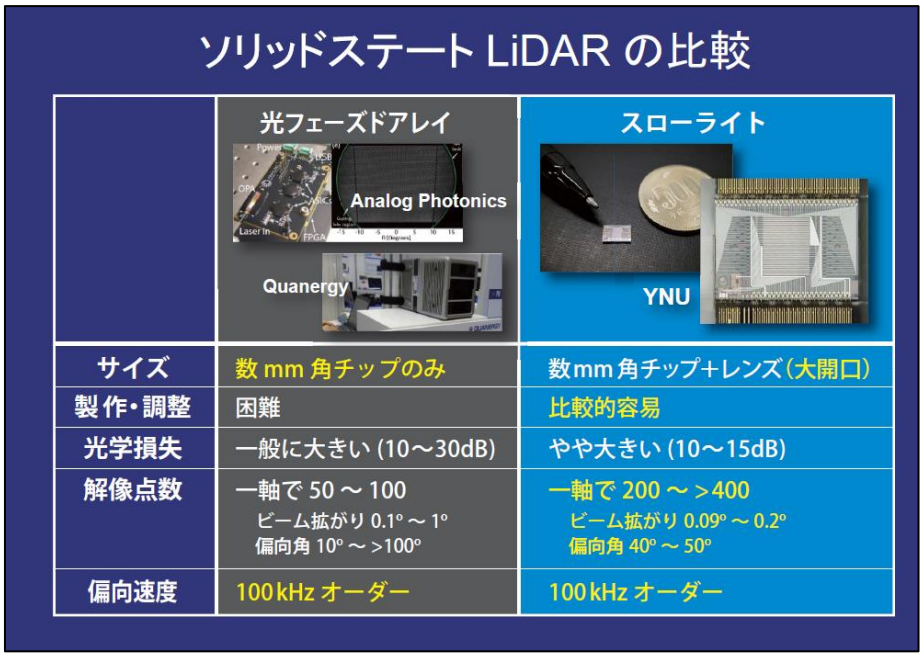


図 4-1-4　光フェーズドアレイとスローライトの比較

非機械式偏向方式として、Analog Photonics が採用している光フェーズドアレイと、我々が取り組んでいるスローライトの比較を図 4-1-4 に示す。サイズについては、光フェーズドアレイは半導体のチップのみで、スローライトは半導体のチップに１個レンズが必要となるため、デメリットともいえるが、後に述べるように、レンズを１個足せることで、レンズによってビームの開口を決められるという別のメリットがある。他方、フェーズドアレイではビームを大きくするために半導体チップだけひたすら大きくする必要があることから、一概にどちらが良いとは言えないと考えている。製作やキャリブレーションについては、フェーズドアレイでは非常に大変で、その部分がまさにチャレンジのポイントであるのに対して、スローライト方式は容易である。スローライトは、損失が少し大きいのが問題だが、ビームを振る性能はほぼ同等である。ビーム走

査のスピードはどちらの方式も既存の LiDAR よりは非常に速い。

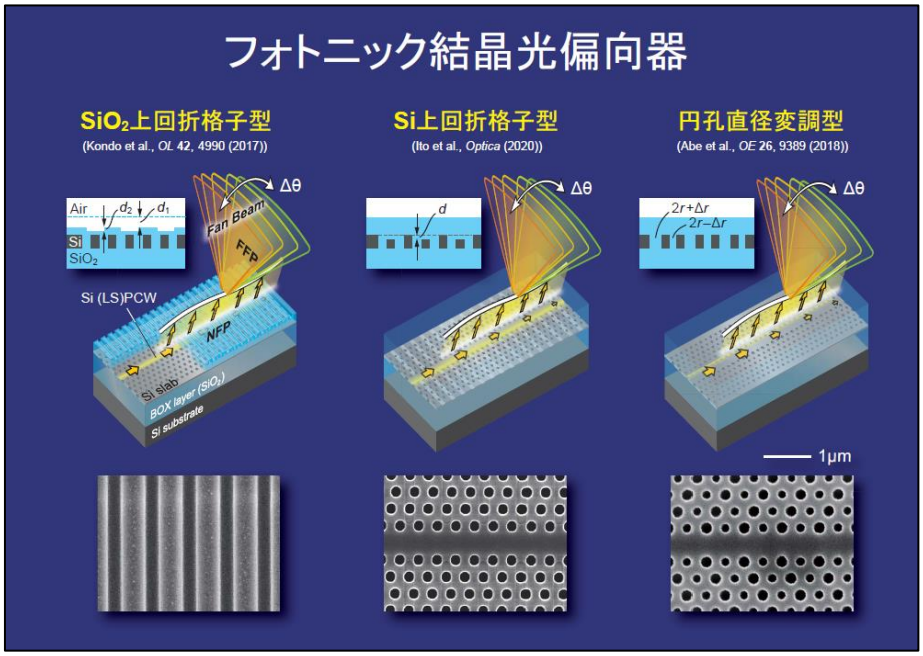


図 4-1-5　スローライト構造を用いた光偏向器

ここで、スローライトについてもう少し詳しく説明する。フォトニック結晶導波路に光を通すと、パルスがゆっくり進むスローライトが発生する。スローライトは、光学の教科書的には、「媒質の１次分散が大きくなるため光の群速度が遅くなる」と説明される現象で、この１次分散こそが、光ビームを空間に放射させたときに、光の角度がどれだけ大きく変えられるかという性質の裏返しであり、結局、スローライト構造を光偏向器に適用すると性能が非常に向上することになる。

具体的には図 4-1-5 のような構造で、フォトニック結晶導波路に何かしらの回折格子を刻んだり、フォトニック結晶のピッチを変えたりしたものを CMOS プロセスで製作する。光ビームはレンズを設けないと導波路方向に対して横には広がり、前後方向には非常にシャープな扇状のビームとなる。この扇状のビームの前後方向の放射角は、波長を変えたり、熱光学効果を用いたりすることである程度振ることができる。例えば、0.1 度刻みでビームを出すことができている。

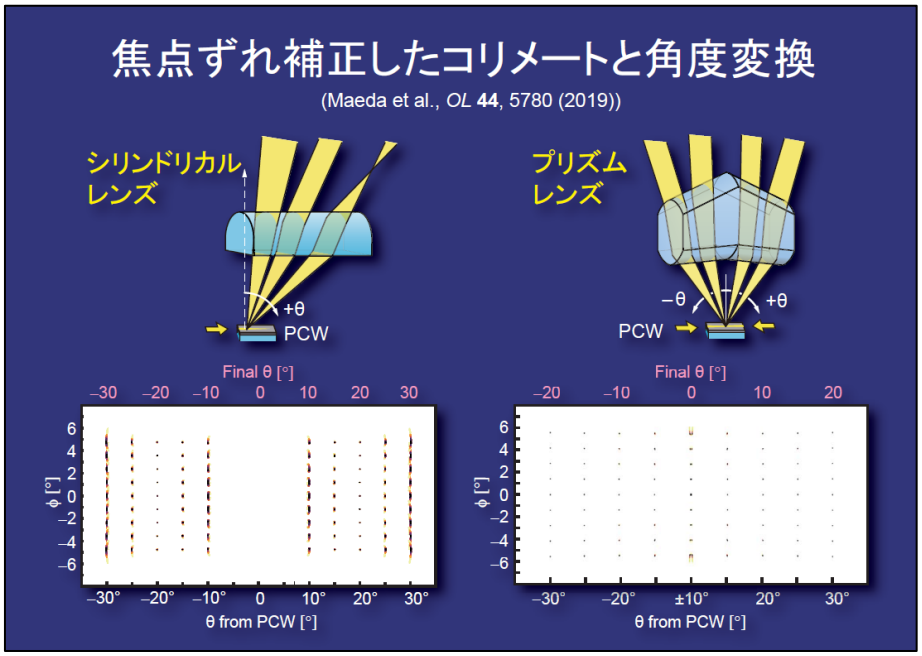


図 4-1-6　コリメートレンズを追加したスローライト型偏向器

ここにコリメートレンズを設けて点状のビームに変換し、多くの導波路を平行に集積すると、レンズとの相対関係で横方向にもビームを振ることができるようになる。ただし、普通のシリンドリカルレンズだと図 4-1-6 左のように、あるコリメート条件から異なる角度に変わると、ビームが広がってしまうが、図 4-1-6 右のようなレンズ形状にすると、すべてのスポットが点状になり、自由に角度が振れるようになる。現在では、熱でも完全に振れるようになっており、非機械式で、一個一個の解像点が自由に動いていくビームができているのはかなり高いレベルの成果だと考えている。また、こうして走査したビームを実際に空間に飛ばして、普通のラスタースキャンやジグザグスキャンとは異なる非常に自由度の高いビームの振り方ができることも確認している。

現在は、図 4-1-7 に示す、変調器、ディテクター、光スイッチ、光偏向器をすべてを集積化したフルチップをつくっており、LiDAR 動作ができつつある。2 次元イメージが距離画像として得られるようになってきている。フェーズドアレイ方式とは、今まさに競争状態だが、JST ACCEL プロジェクトが終わるまでにはかなり仕上げて、関係者に満足していただく所存である。

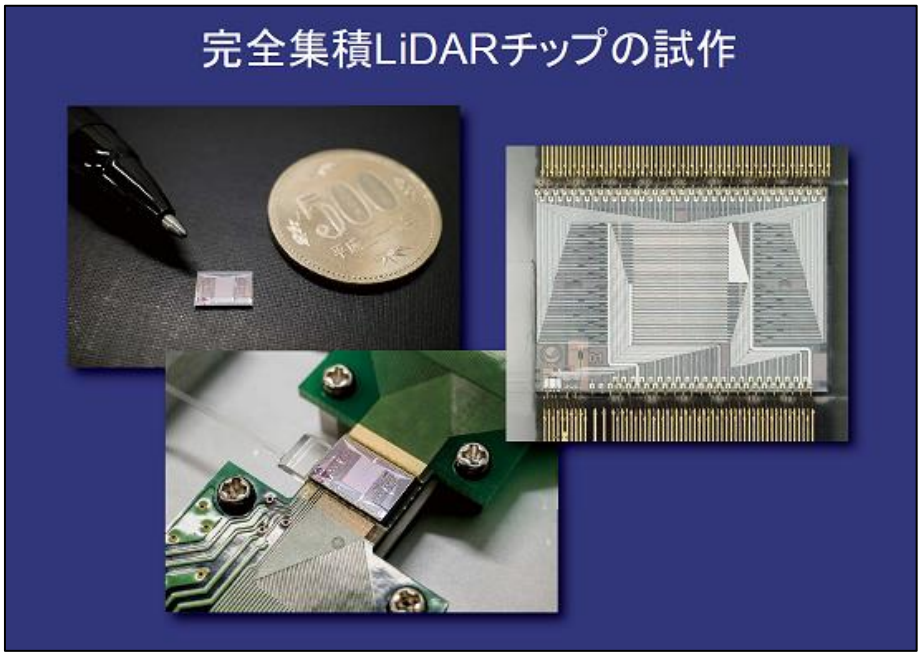


図 4-1-7　完全集積 LiDAR チップ

【質疑応答】

Q: 遠くでレーザを絞ろうとすると、かなり大きなレンズが必要になるのではないか。結局システムのサイズがレンズで規定されたりはしないか。

A: その通りである。遠くで絞るためには出射光束が広くなければならない。しかし、その点はデメリットと言うより、レンズサイズでシステムサイズを決めることができるというメリットだとも考えられる。フェーズドアレイの場合は、チップのサイズを大きくするしかない。

Q: 結局レンズを大きくしないといけないという問題は、原理的に難しいということか。

A: それは原理的に難しい。レンズの大きさが全てを決めて、その余白に電子デバイスを入れていくことになる。

Q: サイズ感がわからないが、どのくらいの大きさなのか。

A: レンズの大きさで 2～3cm 程度である。

Q: 車載で、数百メートル先を求められるポイントにしようとすると、おそらく 10～20cm 程度のレンズではないか。

A: そこまで大きくはない。自動車の場合、目標となる仕様が「25 cm の分解能」ということになっていて、その場合、発散角 0.1 度なら、200-300m 先まで大丈夫。0.1 度を実現するなら開口径 1mm ちょっとで実現できる。

Q: アメリカに 40 社と言うことだが欧州や中国はどのような状況か

A: 図 4-1-2 のロータリー式に出てくる HESAI は中国メーカーである。中国は現状は欧米の後追いになっているが、Velodyne の 500 万円に対して、性能が 8 割、価格が 1/3～1/4 で世に出れば結構インパクトは大きい、その意味で中国は侮れない。フラッシュ型の Continental 社はドイツのメーカーでリーディングカンパニーの一つである。説明はしなかったが、フラッシュ型は、あたり一面をフラッシュライトのようにレーザ光で照らして、戻ってくる光を高速

なシャッターの CMOS カメラで撮っていくと、その距離画像を輪切りにでき、それを再構築すると３次元画像ができるというものである。欧州はそれを盛んにやっている。

Q: アメリカに 40 社あり、しかも動くターゲットの測距をするということは、防衛用のアプリケーションが主で、アメリカ、中国は先端の結果は発表せずに、ローエンドのものが日本を含めた民需の展示会に出ているような気がするが、どう思われているか。

A: 実は LiDAR というのは探すと書籍が非常に少ない。それはそういうミリタリー関係の理由だと聞いている。ただし、近年は自動運転の話題が盛んなので、今のスタートアップのあらわな目標は、全部自動運転がターゲットになっているように見える。

Q: 1.5 μm だと FMCW 方式が使えるということだが、その場合にパワーはあまり重要になってこないのか。一般論として距離を長くするためには、やはりパワーがある方がよいと思われる。

A: それはその通り。例えば Luminar というはファイバーレーザを使っている。高強度の 1 個のファイバーレーザを 10 カ所ぐらいに分岐して、多くの LiDAR に供給するという特許も出している。

Q: 3D センシングの応用例が幾つかあったが、その中で特に馬場先生の方式を使えばユニークで勝てそうというアプリケーションはあるか。

A: ロボット関係は自動車ほどコスト要求が高くないので、小型のロボットに手軽に搭載というのはあると思う。また、LiDAR チップのフルシステムの一部分だけ使いたいというメーカーもある。セキュリティーもそういうものの一つである。

Q: ソリッドステート型は、Velodyne の高機能品の置き換えを狙っているのか。

A: Velodyne の最高性能におよぶ LiDAR はここにはない。あれは最高性能であり、車の自動運転のレースなどに使われている。ソリッドステート型はそのようなフラッグシップを求めるのではなく、LiDAR をもっと安価なものにすることを競っている。センサーフュージョンのように、様々なセンサーを組み合わせたり、複数のものを使うことで価格を 100 分の 1 に落として 10 個使うなど、そんなことの組み合わせが何かできないか模索している。

4．2　光の波面・偏光分布制御と光イメージング

小澤　祐市（東北大学）

これまで位相や偏光といった、光の本質的な性質に着目してイメージング手法の開発に取り組んできた。バイオ・生命科学が主なアプリケーション先であるが、ここでは光工学的な立場から、イメージング分野の技術動向や方向性に関して述べる。

波面制御と偏光分布制御は、イメージングにおいてホットなトピックになっている。制御は 2 つの枠組みで表すことができると考えていて、一つはパッシブな制御、正確に言うとアダプティブな制御である（図 4-2-1）。特にバイオイメージングで生体試料を見る場合、様々な屈折率を持つものが複雑な 3 次元の構造を取っていて、その中に深く集光しようとしても、普通の光ではきれいなスポットが得られない。それを踏まえ、例えばビームに対して LCOS 空間光変調器のようなものを使って波面制御することで逆位相を与え、焦点で回折限界の集光を得る収差補正の技術や散乱体越しの集光をする試みがある。このような試みには歴史があり、まだブレイクスルーが必要と思うが、着実に進んでいる。試料の深部でもきちんと収差補正をすることで非常にクリアな結像ができている。また、散乱体越しであっても、光に何らかのパターンを与えることで、点で集光するアイディア・方法が複数の研究グループから報告されている。

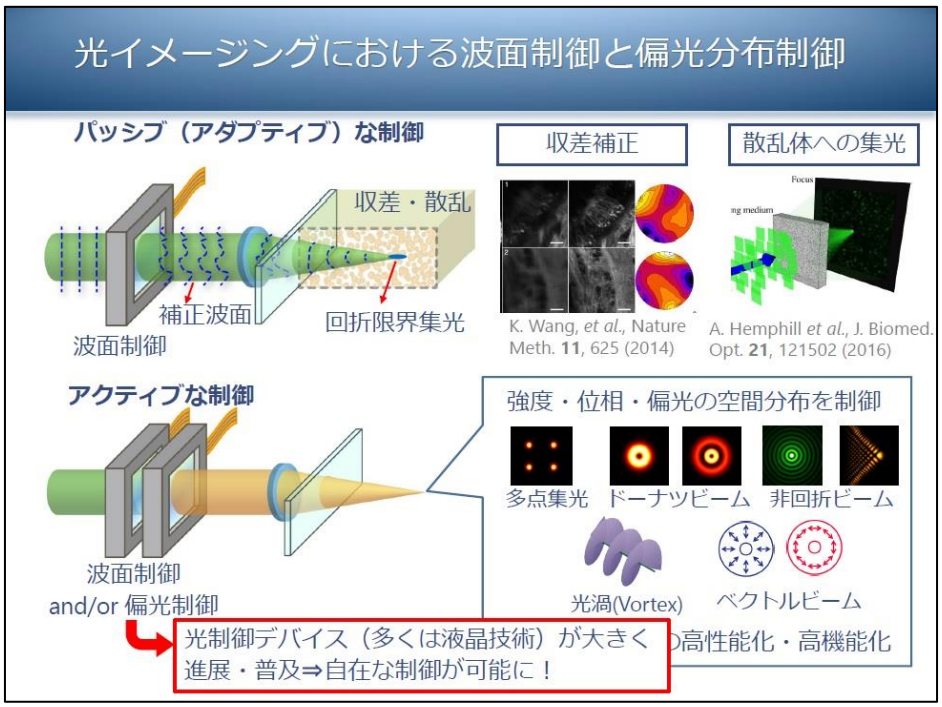


図 4-2-1　光イメージングにおける波面制御と偏光分布制御

もう一方のアクティブな制御というのは、位相や偏光を上手く制御することで、焦点に普通のパターン、いわゆるエアリーパターンやガウスビームのスポットではなく、強度・位相・偏光を制御した様々なパターンや構造を持ったビームを集光する。それによって光イメージングの高性能化、高機能化を図るという方向性である。シンプルには、例えば多点に集光するマルチフォーカルなスポット、さらにはドーナツ状のビームや非回折ビーム、ベッセルビーム、エアリービー

ムと呼ばれるビームにすることで、普通の光では得られない特性を得ようとしている。ドーナツビームとしては、例えば尾松先生がよくやられている光渦がある。光渦という位相の特性、軌道角運動量を持つ光を生成することや、我々がベクトルビームと呼んでいる、偏光が軸対称に分布しているビームを使おうという流れがある。ここで重要なことは、このような試みが可能になってきたのは、光を制御するデバイスがこの 10 年、20 年で大きく進展したことによる。これらの多くは液晶によって実現され、様々な研究者が使えるようになり、自在に制御ができるようになってきた。

特に我々が手掛けてきたのは、光軸を中心に放射状に偏光分布を持つベクトルビームで、普通の光では得られないような性質が見られる。一つには、NA が大きいレンズで強く集光すると、その焦点に光軸方向に平行に振動する電場が強く発生するという性質がある。さらに、この性質を細かく丁寧に見ていくと、いわゆる高次横モードは普通だったら集光特性が悪くなるが、このビームに限れば横モードになればなるほど焦点のスポットが小さくなる。このような性質をもつビームをレーザー顕微鏡法のプローブ光として使うと、空間分解能が上がるといったことを報告してきた。

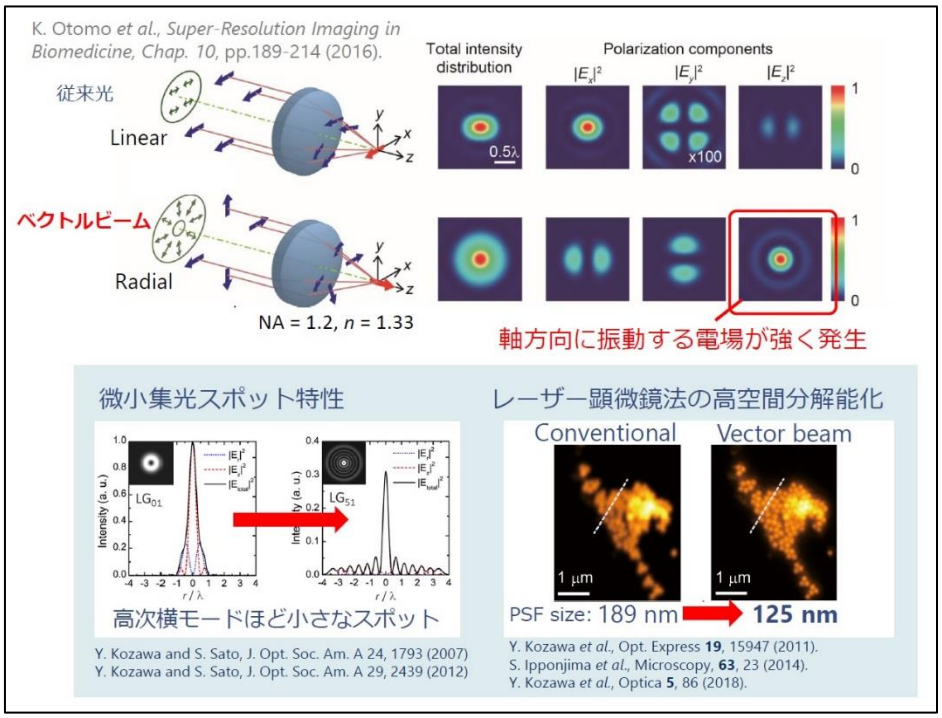


図 4-2-2　光イメージングにおける波面制御と偏光分布制御（ベクトルビーム）

図 4-2-3 にバイオイメージングに求められる性能を示す。ここでは特に far field の蛍光イメージングを対象にしている。性能指標としては、観察する次元や分解能、速度、深度、視野などが挙げられる。まず、従来技術について見てみると、次元では XY の 2 次元、それに Z を追加して 3 次元、さらに時間を加えて 4 次元というのが普通である。可視光や近赤外光を用いた場合には、回折限界という壁があるため、分解能は 0.5λ/NA で 200～300nm になる。また、速度は、ガルバノミラーやレゾナントスキャナーというものを使ってレーザー光を振れるようになったため、市販ベースのレーザー顕微鏡でも 1 秒間に 30FPS、3 次元では 1 秒間に 1 ボリュームで撮れるよ

うになっている。さらに、深度は多光子顕微鏡だと数 100μm くらいの深さのところが見られ、視野も mm オーダーで見えるようになっている。将来目指すところは、次元についてはもっと増えて、多色やスペクトル、あるいは配向を見たいという話になっている。空間分解能という点では、超解像イメージングがこの 10 年でかなり進展し、nm オーダー（ほぼ分子レベル）に向かっている。速度は 2 次元であれば 10,000FPS で撮れる技術が既にあり、3 次元であっても 100VPS という話が出てきている。深度については、生きた試料を大きく見たいので、mm レベルが欲しい。視野も大きく広げて、細胞だけではなく組織、器官、あるいは個体まで見たい。これらについて、個々には実現できている例もあるが、全てを満たすような技術は無い。解決しなければならない問題として、収差補正や散乱、光源、ディテクター、プローブなど多くの技術的課題がある。

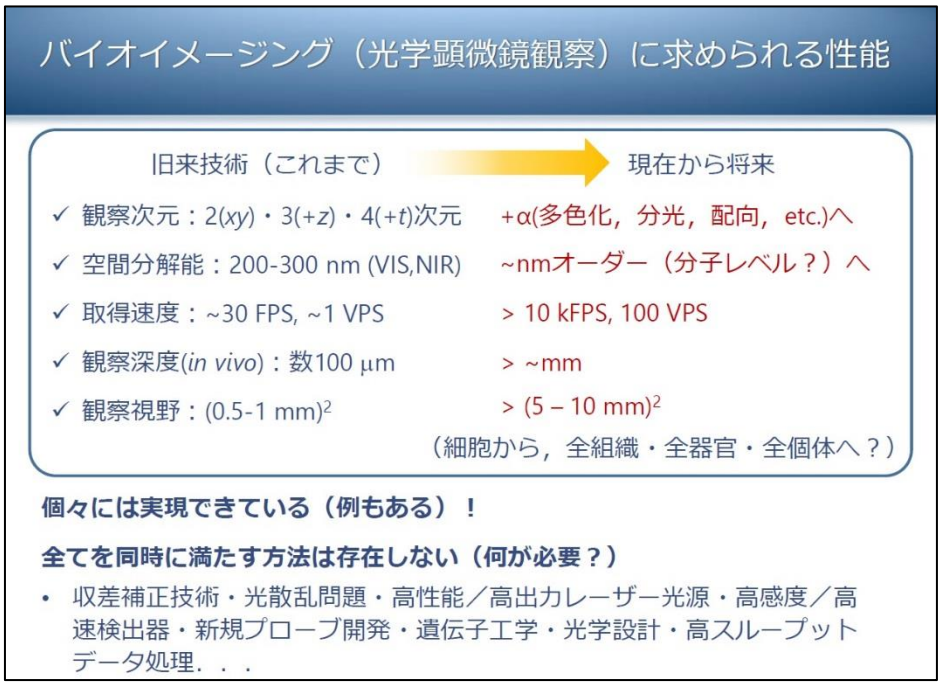


図 4-2-3　バイオイメージング（光学顕微鏡観察）に求められる性能

回折限界を超える分解能が得られる超解像イメージングについては、ストライプ状のイルミネーションを使う構造化照明法や、場所を精度よく見ていくローカリゼーション法、普通の励起光にドーナツ状の脱励起光を当てることで発光領域を小さくする STED 法、最近ではイメージスキャニング、飽和励起を使う方法もある。さらに、厳密な超解像とは意味合いが少し違うが、位相や偏光を使って制御して得られる究極的に小さいスポット、ホットスポットを使うスーパーオシレーションという方法も登場している。この分野はこの 10～15 年で急速に進展しており、数年前にはノーベル賞が与えられた。そのような中で、100nm 程度の空間分解能は既に当たり前の時代になり、その幾つかについては製品化も進んでいる。STED 法では神経細胞のシナプスと呼ばれる部分を高い分解能で見ることができるようになり、最近では、ミトコンドリア内の構造がライブで見られるところまで進んでいる。ただし、このようなツールが実際の試料に適用でき、日常的に性能を発揮できるかという点では、様々な問題がある。例えば STED 顕微鏡の場合、各色素に応じて STED が効くレーザー波長が決まっていて、特に赤色に近い波長が多いが、対応する

高出力の光源があまりない。そういったものを開発していく必要がある。

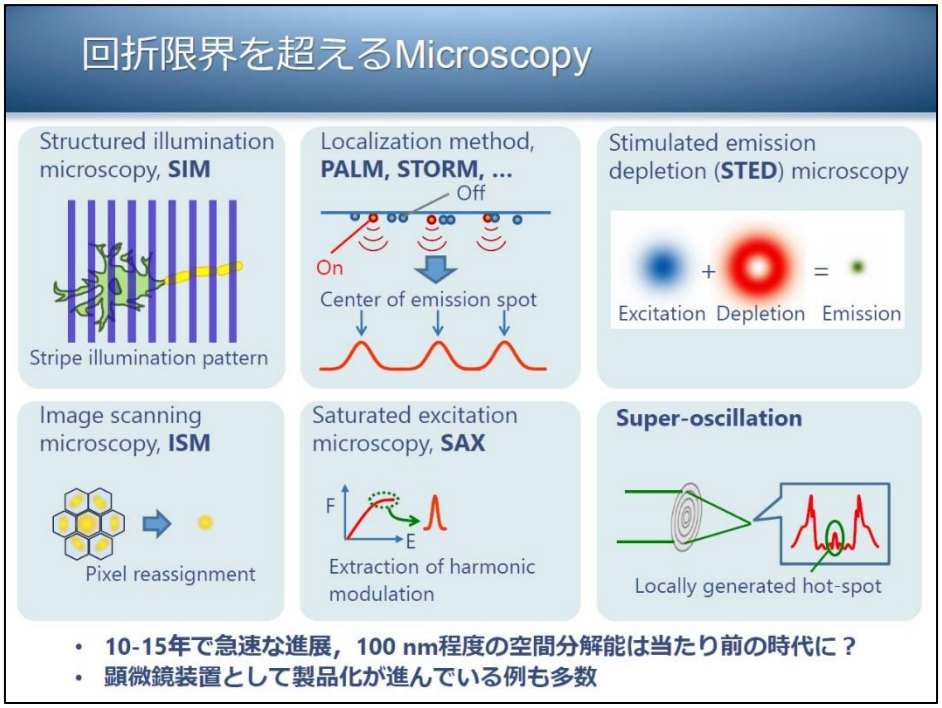


図 4-2-4　回折限界を超える Microscopy

ユーザーである脳神経科学者がやりたいことは、脳の中を生きたままで高分解能に見ることである。また、広範囲にデータを取得したい。それについては、多くの国で大きな研究プロジェクトが進んでいる（図 4-2-5）。プロジェクトの目的は様々だが、脳の中の神経細胞を可視化して仕組みを知ろうという方向性である。人の脳の中には神経細胞が 100 億個以上あり、そのつながりを考えると膨大な数になるが、それを本当に理解したいというのがモチベーションになっていると考えられる。

そういう意味で、光イメージングが果たす役割というのは極めて大きく、特に多光子励起に基づく深部イメージングというのが重要になっている（図 4-2-6）。マウスの脳の上からレーザー光を入れることで、深いところまで神経細胞を可視化できる。さらに、それを生きたままで見るというのが最近の流れになっている。そのポイントは、生体の窓と呼ばれる近赤外の波長域における短パルスレーザー光源の進展によるところが大きい。もちろん、それに加えてディテクターの進展もある。図 4-2-6 の例では、よく知られている Ti サファイアの光源ではなく、利得スイッチ型の半導体レーザーをベースにファイバーで増幅している。こうした技術で実現される高信頼性、高ピークで小型の光源によって、このような結果を生み出すことができている。最近では、カルシウムイメージングで深いところの神経活動が見られるまでに進展している。また、多光子イメージングというのは、バイオだけではなく、結晶内部の欠陥の可視化にも使われ始めている。GaN のフォトルミネッセンスで転位は光らないが、多光子イメージングで可視化できるという話がある。なお、ここで重要なのは、多光子イメージングの心臓部は光源であるが、現状、ほとんど海外メーカー頼みになっている。何かあったときに常に海外に問い合わせをしなければならず、体制が難しい。コスト的な問題もあり、そういう点を考えていく必要がある。

図 4-2-5　ユーザー（例えば脳神経科学者）は何を見たいのか？

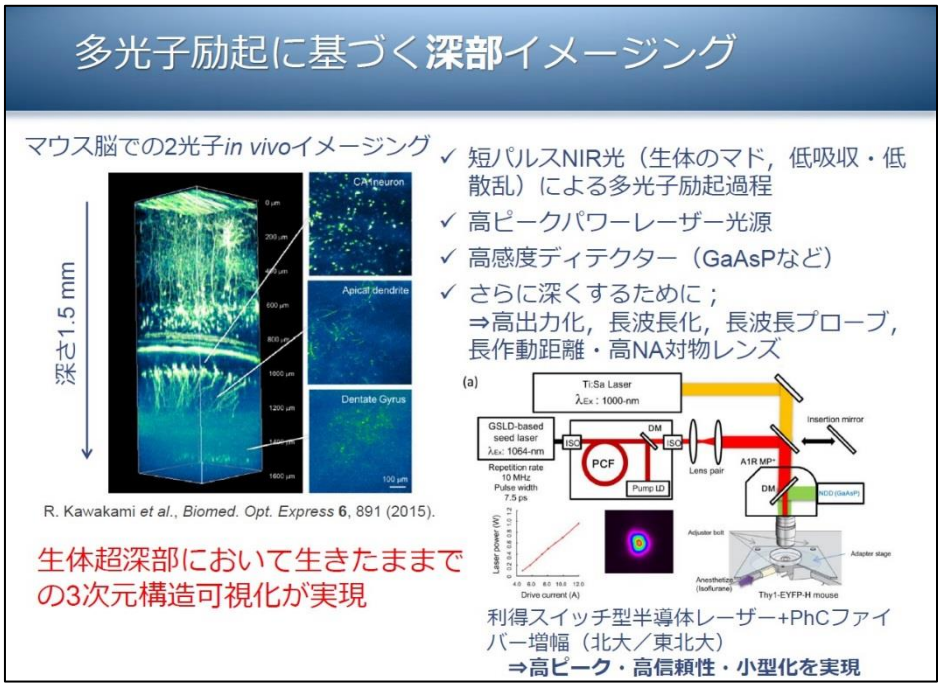


図 4-2-6　多光子励起に基づく深部イメージング

また、3 次元イメージングは時間がかかるが、光の特性を上手く使うことで、簡単に高速で撮れるようにしたいと考えている（図 4-2-7）。レーザー顕微鏡で、ニードル状のスポットのビームを使って、2 次元走査を 1 回だけで 3 次元の画像を撮るというのに最近取り組んでいる。3 次元のイメージングにも、光の位相や振幅という性質を使えば、もっと精度が上がるのではないかと考えている。

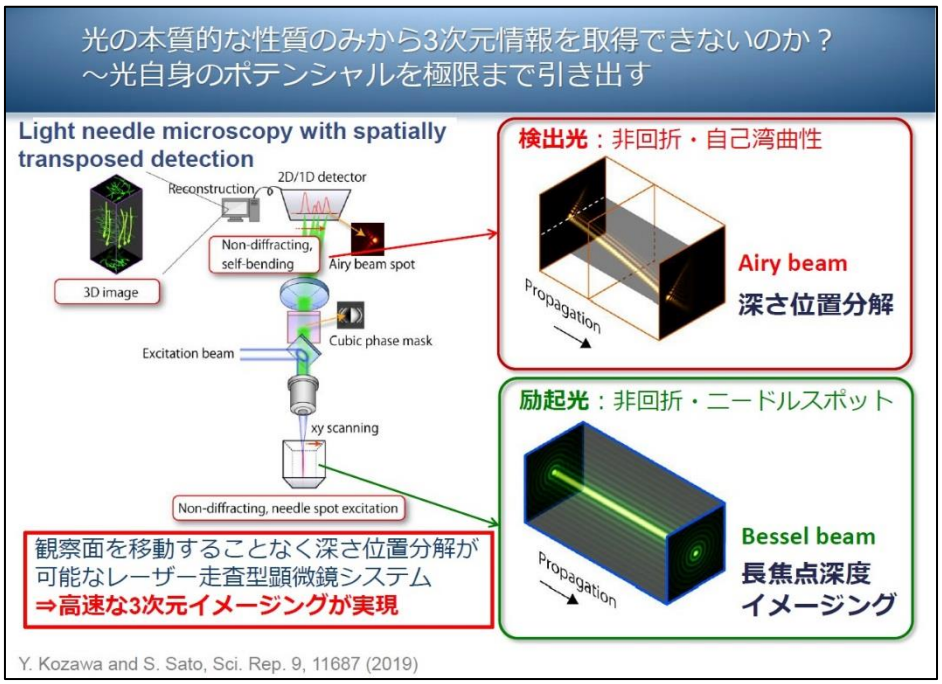


図 4-2-7　光の本質的な性質のみから 3 次元情報を取得できないのか？

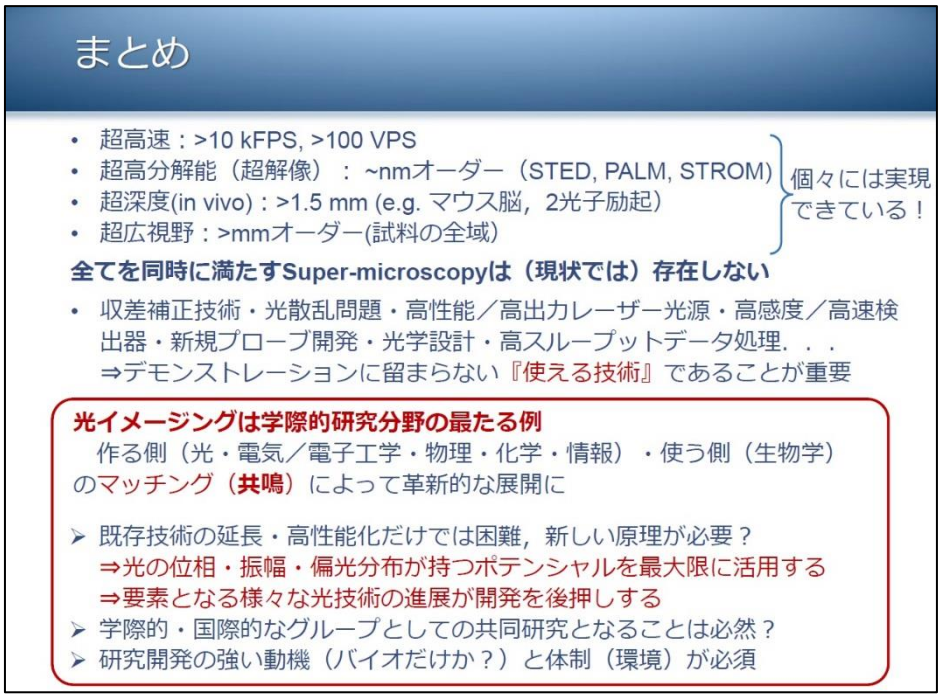


図 4-2-8　まとめ

図 4-2-8 にまとめを示す。全ての性能要求を満たす“すごい顕微鏡”というのは現状では存在しない。しかし、イメージングは超学際的な分野であり、つくる側と使う側のマッチングが非常に重要といわれている。学際的研究によって初めてすごい展開になるのではないかと、私自身も考えている。

【質疑応答】

Q: 光源は重要でありながら、海外に依存しているとの話があった。実際、波面制御の場合には空間変調器とレーザーが必ずセットで必要になるが、国内メーカーの製品は特定の波長で限定的にしか使えないといった問題があり、海外のメーカー頼みになっている。どういう仕組みがあれば海外頼みがなくなると思われるか。

A: どうすれば良いか、自分も知りたいところだが、まずは自分のような研究側（使う方）とつくる能力のある会社とがもっと密にやりとりする流れができて欲しい。あるいは、研究者が自ら会社を興すというのも考えるべき点であると思う。いずれにしても、つくる側と使う側がお互いにもう少し歩み寄って、色々と議論できるようになればと思う。

Q: 世の中でレーザー顕微鏡は全く売れていない。病院に行ってもどこにもない。2 光子顕微鏡はもっと少ないし、超解像もない。なぜかというと、ハロゲンランプで十分だからである。蛍光顕微鏡は 10～30nm のスペクトル幅で励起すれば良く、単一波長が必要なアプリケーションでなければレーザーは使われない。もちろんレーザーを使って最先端の研究成果は出てくるが、市場に残るためには、レーザーでなければならないというアプリケーションがないといけない。アプリケーションがなければサイエンスとしてある時期だけ流行っても、長く続かない。むしろ広帯域な光源で寿命の長いものの方が、病院では期待されているのかも知れない。かつて近接場顕微鏡も盛り上がったが、マーケットがないと続かない。

A: アプリケーションという意味では、一般の様々な方が使うアプリケーションと、先端的なところで使われるものは、ある程度分けて考えた方が良いと考えている。もちろん皆が使える用途を置き換えていければ素晴らしいとは思うが、一方で超解像でしか見られないものがある。超解像であるからこそ見えてくる応用、バイオロジー、そういう話が盛り上がっていくと、ニーズも出てくるのではないかと考えている。

4．3　バイオイメージングとレーザー光源への期待

小関　泰之（東京大学）

この 10 年ほど、パルスレーザーを使った誘導ラマン顕微鏡というバイオイメージング手法の研究を進めてきた。この分野は世界中で様々な研究が進められているが、我々は独自のパルスレーザー光源を使って世界最高速のラマンイメージングを実現している。最近では感度限界が物理的に見えてきたため、この物理限界を乗り越えたいと考え、昨年度から CREST「量子技術」で量子光源を使うテーマを開始している。2013 年に参加した CRDS 俯瞰ワークショップでも述べたが、10 年先を読むのは極めて難しい。10 年前には自分がこんなテーマをやるとは全く考えていなかった。

バイオイメージングが目指す方向、何がバイオイメージングで見えると嬉しいのか、という話から始める（図 4-3-1）。現状の生体イメージングでは、生命現象のほんのわずかしか見えていない。人間の体は 36 兆個の細胞からできていて、細胞一個の中を見ても、無数の生体分子・イオンなどが密集している。これらを少しずつ見ようとしている状況であり、研究の方向性も相当多岐にわたる。いかに多くの情報を得るか、いかに広い視野で見るか、いかに空間分解能を高めるか、いかに深いところを見るか、いかに動いている状況を見るか、そして多数のものを同時に見るかなど、明確な方向性はあるが、一気にこれらを全て実現するのは難しい。また、未だに可視化の難しいものがあり、例えばイオンや小さな生体分子、さらには熱や硬さをいかにして見るかという研究もある。一方で、このようなものが診断や術中のイメージングなどに使えると、インパクトが大きい。このような研究ベースから、どこかでスピンアウトできるような方向性があれば良いと思っている。

何が見えると嬉しいのか？

- 現状の生体イメージングでは生命現象のほんのわずかしか見えていない
  - 人間の体は36兆個の細胞からできている
  - 細胞一個の中にも無数の生体分子・イオンなどが密集している。
- 超広視野(>10 mm)・高空間分解能・深部(>10 mm)・動態可視化・多色化（5色以上）
- いまだ可視化が難しいもの：イオン・小さな生体分子・熱・硬さ・・・
- 診断・術中イメージングに使えるとインパクトは大きい。

図 4-3-1　バイオイメージングが目指す方向

最近のバイオイメージングでインパクトの大きいものとしては、キヌザルと呼ばれるモデル動物の脳、これはマウスの脳より格段に大きいが、その脳の細胞全部を見ることができるようになったこと、細胞の中に含まれる 4 種類程度のタンパク質をリアルタイムで見ることができたことなどがあり、様々な報告がインパクトの高いジャーナルに報告されている。また、超解像による空間分解能の向上や、深部観察、超多色イメージングというような方式がこの 20 年ぐらいで急速に発展してきている。

現時点での応用はどうしても生物学・医学研究であるが、その中でも光源やシステムには経済効果がそれなりにあると考えている。また最近では、AI をイメージングに活用していくという検討も急速に普及している。

超解像イメージングは、従来は細胞のごくわずかな部分が見えたというのをすごいと言ってい

たが、最近ではショウジョウバエの脳全体が見えるとか、さらに超解像だけではなく、サンプルそのものを大きくするといった技術もどんどん使われており、この分野は非常にホットになっている。また、深部を見るイメージングや高速イメージングも発展しており、多光子励起を使うなど、パルスレーザーの活躍の場にもなっている。

そのような中で、光源がいかにコミットしていくのかが問われる。光のイメージング応用に期待される光源としては、パルスレーザーや波長可変レーザー、中赤外レーザーというのが重要になってくると考えられる。これらは性能がどんどん良くなっており、最近では固体レーザーからファイバーレーザー、半導体レーザーへと移行している。波長可変レーザーは OCT にも使われており、我々も自分たちでつくったりしている。中赤外レーザーは波長変換、光パラメトリック増幅、量子カスケードレーザーなど、非常に良い方法が出てきている。

さらに、最近の光源の性能は素晴らしく、例えばテラヘルツのパルスは恐るべきピークパワーが出せるようになっている。また、光集積回路を用いた光コムは、一昔前の光コムのチタンサファイアのレーザーに比べて 100 分の 1 以下のサイズになっている。こうした技術をもっとバイオイメージングに使えたら良いと考えている。

そのような中で、バイオメディカルという分野において光源技術の状況は 6 年前の CRDS 俯瞰ワークショップで示したスライドの内容と全く変わっていないと感じており、同じスライドを持ってきた（図 4-3-2、図 4-3-3）。日本は、世界をリードする光源技術が多く、半導体レーザー、ファイバーレーザー、超短パルスレーザー、光コム、テラヘルツ、フォトニック結晶などがある。光ファイバーそのものも技術が高い。一方で、他分野との融合を見据えて応用を意識した光源が不足しているというのが、日本の一つの課題と思われる。このため、日本のバイオメディカルの研究者は海外のレーザーを使っている。それに対して、海外ではレーザーの研究者と他分野の融合研究をどんどん進めており、それがイノベーション・スタートアップ・産業を生む流れにつながっている。そのように、2013 年時点でも考えていた。

光源研究というと、どうしても未開拓領域のテラヘルツや極短紫外、エックス線が注目されがちである。一方で、可視～近赤外は産業や他研究分野へのインパクトが大きいが、応用に特化した最適な、もしくは高機能な光源が不足している。したがって、レーザーを研究するだけではなく、応用を見据えた光源に特化させていき、異分野との融合を進めて、スタートアップにつなげる必要がある。自分がやれと言われると少し耳が痛いが、そういうことをやって、科学を支える基盤技術の一つとしての光技術の強化と新産業の創成を進めていくことが重要と考えている。一方で、レーザーの研究者から見た融合分野の難しさというものもある。レーザーの研究というのは世界トップの性能を出すことが重要であるが、異分野の研究者が求めるレーザーというのは従来の性能で済む場合も多く、得てしてレーザーの研究者が下働き状態になりがちである。この状況を打破するには、融合分野に飛び込んで開拓する人材・組織が必要であり、自分もパルスレーザーをバイオに持ち込むことで、その一端を担っているつもりである。

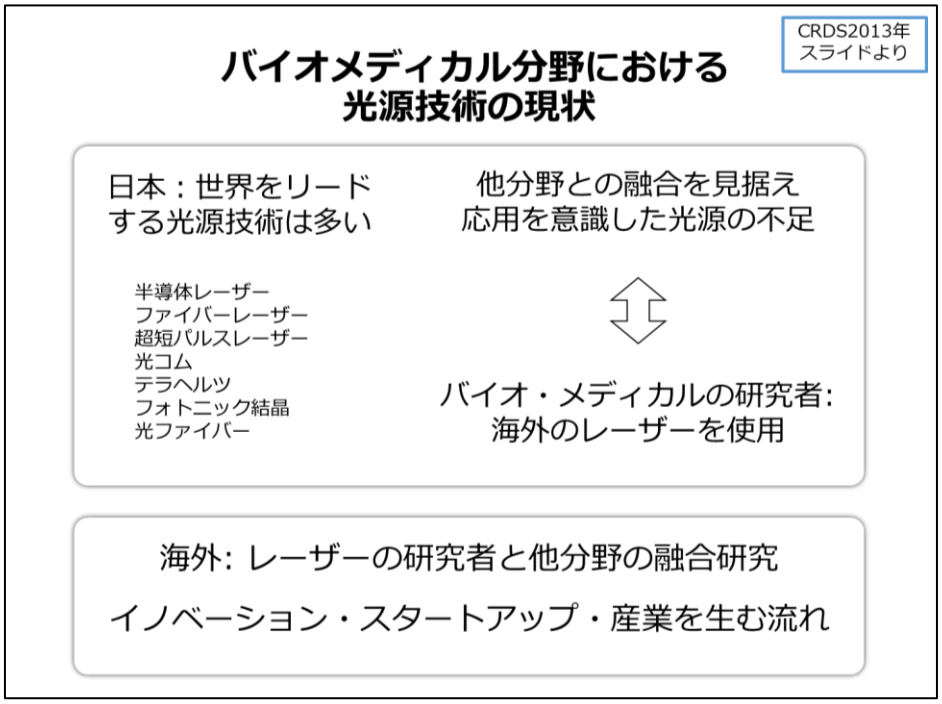


図 4-3-2　バイオメディカル分野における光源技術の現状

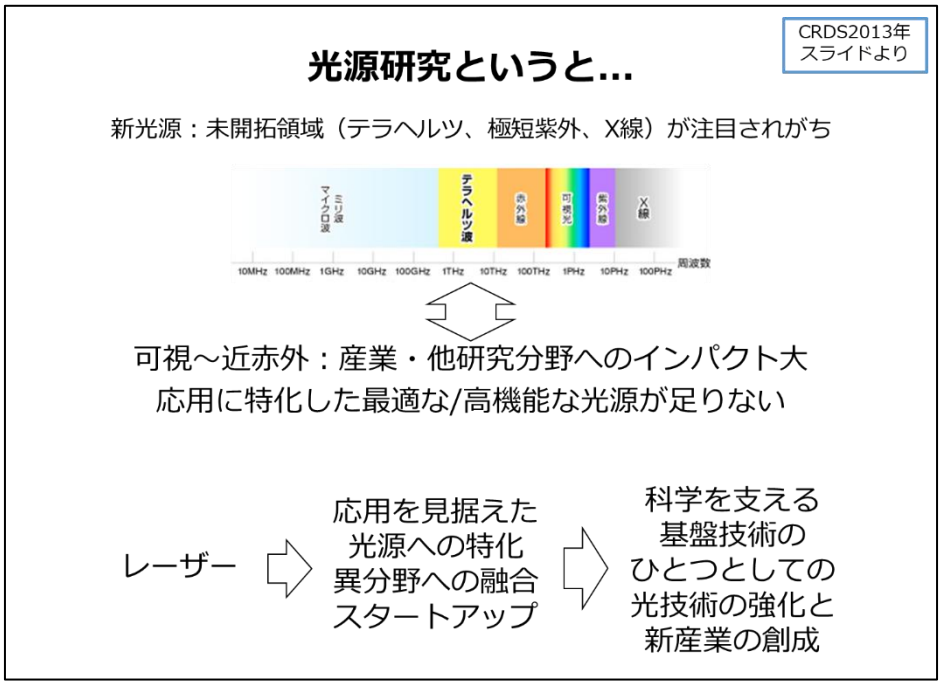


図 4-3-3　光源研究というと

世界を見ると、多光子顕微鏡の分野では、コーネル大学の一番トップのグループが 1.3 μm、1.7 μm 帯のパルスレーザーを用いた 3 光子イメージングの研究を進めている。これは実は光通信に立脚したパルスレーザー技術で、もともと多光子顕微鏡の研究室を出てベル研に行き光通信をやった研究者が、コーネル大学に戻ってこのような研究をやっている。一方、日本では北大の根本

先生と東北大の横山先生が、半導体レーザーを使った 2 光子イメージングをこの 10 年ほど研究されており、それが良い成果につながっている。このように、光通信に立脚したパルスレーザー技術がバイオイメージングの光源に展開されており、日本にもよい流れができつつある。これをもっと進めていかなければならない。

以上、バイオイメージング全体の話を述べてきたが、次に自分の分野に近いラマンイメージングの動向について述べる。先月、大阪大学で Biomedical Raman Imaging 2019 という学会があり、そこでの日本の研究者の発表内容をリストアップしてみた（図 4-3-4）。詳細には触れないが、どのグループも生物系や医学系の研究室と上手く連携し、世界にそれなりのプレゼンスを持っているという感触を得ている。今後、高性能かつ実用性の高いレーザー開発を継続しつつ、化学系との連携を推進していく必要があると考えている。

ラマン顕微法の日本のグループのトピックス
（主にBiomedical Raman Imaging 2019で仕入れた情報）

- 自発ラマン顕微鏡の高速化と応用の進展
  - 阪大 藤田/理研 渡邉
- 広帯域CARS顕微鏡の高速化・多色化
  - 北大 橋本/筑波大 加納
- 高速SRS顕微鏡の応用
  - 東大 小関
- フローサイトメトリー応用
  - 東大 合田
- 中赤外光熱顕微鏡の開発
  - 東大 井手口

- どのグループも生物系・医学系の研究室と連携し、世界にプレゼンスを持っている
- 今後、高性能かつ実用性の高いレーザー開発を継続しつつ、化学系との連携（ラマンプローブ等）を推進する必要あり

図 4-3-4　ラマン顕微法の日本のグループのトピックス

一方で世界を見ると、これも詳細には触れないが、かなりアクティブである（図 4-3-5）。応用展開は米国が非常に強く、医学と生物学、化学が上手く同じフロアにいて融合研究を進めている。レーザー光源はドイツが強い（これは後で紹介）。また、米国帰りの研究者が中国に多く移っており、既に中国勢の勢いも非常に強いという感触を持っている。

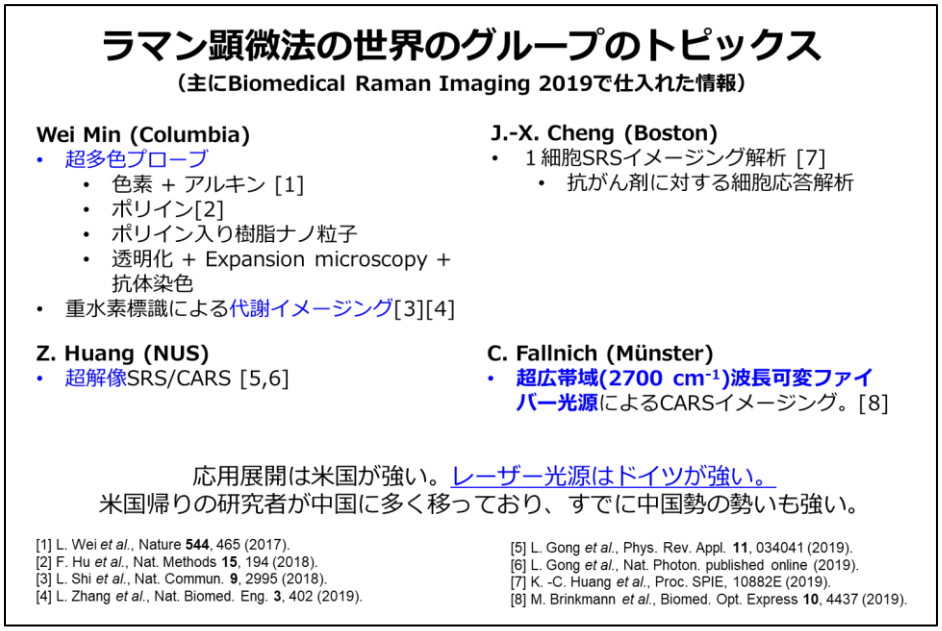


図 4-3-5　ラマン顕微法の世界のグループのトピックス

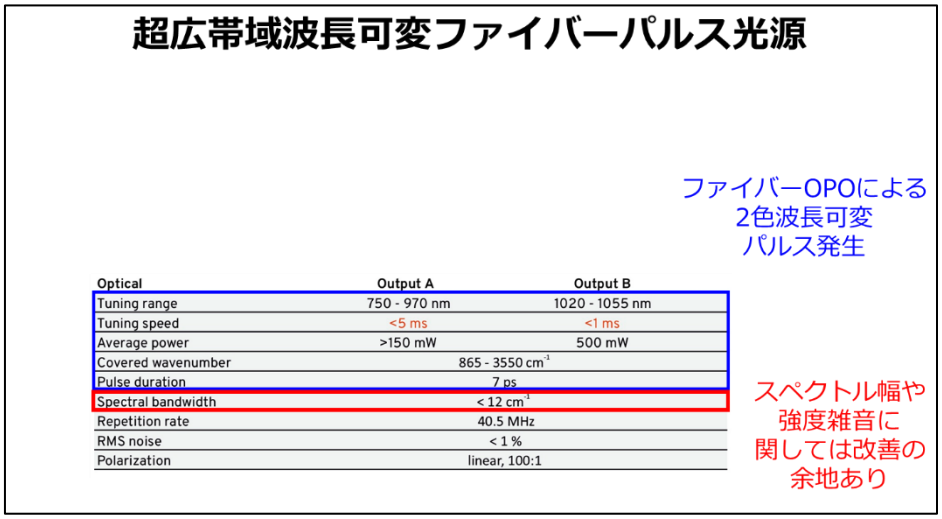
最近のラマンの新しい応用について簡単に紹介する。もともと河田先生や理研の阪大グループから始まった研究で、アルキン（炭素-炭素３重結合）を様々な分子にくっつけると、その分子をラマンで上手く検出できるというのがある。このアルキンタグによって様々な生体分子を標識し、その取り込み、生合成、分解などの代謝動態をイメージングするというのが、現在のアクティブな研究テーマになっている。また、これをさらに発展させ、様々な振動周波数の分子をうまく化学合成し、生体分子を標識するプローブとして使うと、超多色のイメージングができる。従来の蛍光イメージングでは、可視のスペクトルに蛍光のスペクトルを並べていき 4 色程度でぎりぎりだったが、ラマンのスペクトルは非常に狭いので、10～20 色を並べることができる。それによって超多色のイメージングができる。これは、ラマンのキラーアプリになる可能性があるといわれ、非常にホットなトピックになってきている。このように、様々な研究の方向性がある中で、このような動態を見る、また多色化するというところにラマンがアプローチできる状況なってきており、我々としてはもっと頑張っていきたい。

また、ドイツのグループが超広帯域の波長可変ファイバーパルス光源というものを最近報告して、スタートアップを立ち上げた（図 4-3-6）。これは 2 色の波長可変パルス発生であり、応用に合致したパルス光源を開発して製品化している。これは大変注目される。

以上をまとめると、生体イメージングというのは異分野融合／連携を必要とする分野であり、日本でも異分野連携は進みつつあると考えている。その中で、パルスレーザー技術は多光子イメージング、ラマンイメージングなど、様々なイメージング技術の基盤となるものであり、その性能向上、実用性向上を継続することは重要である。パルスレーザーの観点からいうと、応用を見据えた光源への特化と製品化を推進することが重要である。また、光源の開発だけでなく、化学との連携、生物学との連携というのが非常に重要である。

また、これは蛇足あるが、融合領域研究というのは上手くいかないものが大半で、たくさん試した中で、ごく一部が上手くいく。上手くいっている研究を推進するだけではなく、様々な試み

を許容するための基盤研究費の拡充というのも必要と考える。



Optical	Output A	Output B
Tuning range	750 - 970 nm	1020 - 1055 nm
Tuning speed	<5 ms	<1 ms
Average power	>150 mW	500 mW
Covered wavenumber	865 - 3550 cm^{-1}	
Pulse duration	7 ps	
Spectral bandwidth	< 12 cm^{-1}	
Repetition rate	40.5 MHz	
RMS noise	< 1 %	
Polarization	linear, 100:1	

図 4-3-6　超広帯域波長可変ファイバーパルス光源

【質疑応答】

Q: イメージングでは、デジタル技術との組み合わせが非常に重要になっている。例えば最近のデジタルカメラで周辺のひずみがなくなっているのは、光学系が良くなったわけではなく、データ処理による部分が大きい。どこまでをデータ処理でやって、どこまでをハードで受け持つのかという棲み分けを見据えていくことも必要ではないか。

A: 同感である。AI 活用の検討も急速に普及していると述べたが、恐らく AI だけでは狭く、画像処理技術が最近では非常に進んでいる。画像処理の中でも特にノイズを減らす技術は進展が著しく、そういった技術はどんどん取り込まれている状況にあるので、ここではあまり触れなかった。

Q: デジタル技術と組み合わせる上で、外せない物理のポイントなどがあるのではないか。

A: AI や画像処理は物理系がある程度動いている上で、さらにその性能を高めるものである。まずは物理系のところをきっちり押さえるというのがいつの時代も重要であると考えている。

Q: レーザーは海外から買うとのことであるが、そうした海外の会社は、どの程度の規模の会社か。

A: コヒーレントやスペクトラ・フィジックスという会社はある程度大きいが、一方で、我々のラマンの分野で使われる APE という会社は、比較的中規模、小規模の会社と認識している。

Q: 海外では小規模、中規模でも世界中の研究者が使いたいと思えるようなものをつくることができるのに、日本は大企業から中小企業までそれなりの技術力を持っていながら、日本の会社からそういうものが生まれてこないのはなぜか。

A: 個人的な見解であるが、大企業だからこそ大きなマーケットがないと手を出せないという背景があると認識している。技術力の問題ではない。つくろうと思えばつくれるが、大企業に見合うマーケットがあるかどうかというところが、大企業が最後の一歩を出せない理由になっていると考えている。

Q: 海外は、中小企業にとってのマーケットはあるということか。しかし、日本にも同じように中小企業はあると思うがどのような状況か。

A: それについては答えるのは難しいが、日本でもレーザーをつくっている会社が出てきているという話もあり、少しずつ広がっているとは思う。

C: コヒーレントやスペクトラ・フィジックスはレーザーの専門メーカーである。大きくても小さくても、レーザー専門のメーカーはレーザーから逃れられない。一方、日本のレーザーは通信メーカーや半導体メーカーが扱ってきたので、大きなマーケットがなくなったらその部門は違うところに移されてしまう。したがって、日本の企業は多角的に様々な開発をしているが、海外は中小企業から大企業まで、割と専業のメーカーが多いことが理由ではないか。

Q: 幾つかのスライドについて、6 年前のワークショップのときから状況が変わっていないとのことだったが、6 年間のうちに大きな変化がなかったのはなぜか。

A: 伝えたかったのは、完全に変わってはいないが、変わりつつあるということ。日本にも良い流れができつつある。この流れをもっと進めていきたい。

5．次世代光学素子／新たな光基盤技術

5．1　集積ナノフォトニクス技術の新しい展開

納富　雅也（東京工業大学／NTT）

ナノフォトニクスは、光スイッチ、レーザー、メモリなどの小型化・超低消費電力化に貢献できる技術であり、その研究がどのような方向に進んでいるか、私の研究成果を例にして紹介したい。

1 つ目はナノフォトニクスとナノマテリアルの融合の話である。最近、プラズモニクス導波路にグラフェンを貼り付けたもので光スイッチ動作を達成したが、従来の光スイッチと比べてどの程度の性能が出ているかを示したものが図 5-1-1 である。縦軸がスイッチ時間、横軸が消費エネルギーである。従来のスイッチは青い部分であり、エネルギーと時間の積がせいぜい 10^{-24} であったが、今回の我々の成果は 10^{-26} のラインに乗っており、低消費電力化と高速化を同時に達成することができた。消費エネルギーで言うと 2010 年の成果の方が優れているが、スイッチング時間を 1ps 以下の非常に高速な領域で達成できたという点が大きい。フェムト秒領域かつフェムトジュール領域で動作する初めての光スイッチであり、ピコ秒以下で動作するスイッチとしては、従来のものより 100 分の 1 程度の消費エネルギーを実現した。

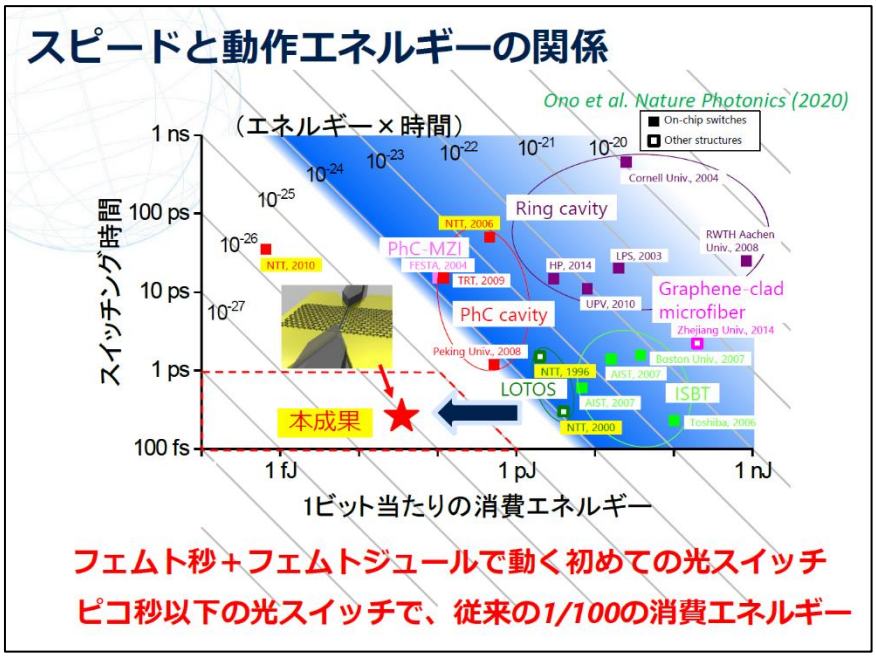


図 5-1-1　光スイッチのスピードとエネルギーの関係

これが実現できたポイントの一つはグラフェンという新しい物質を用いた点である。特にグラフェンの数ある性質のなかで、高速な可飽和吸収材料という性質を用いている。グラフェンが持つディラックコーンという特殊なバンド構造から生まれる性質をプラズモニック導波路と組み合わせた。プラズモニック導波路に関しても、20nm×30nm の最もサイズが小さく、波長の 4000

分の１くらいのところで光を閉じ込められるものを用いた。

もともとプラズモニック導波路を使えば光の強度を増強できることは知られていたが、単にプラズモニック導波路だけにしてしまうとロスが大きくなってしまうため、相互作用を起こすところだけにプラズモニック導波路とグラフェンを用い、それ以外は低損失のシリコンを用いて、それらを低損失で繋いでいる点が我々の特徴である（図 5-1-2）。普通のシリコン導波路が横幅 400nm、厚さ 200nm であることを考えると、縦にも横にも 10 倍以上大きい導波路に、効率 67%で繋ぐことができている。

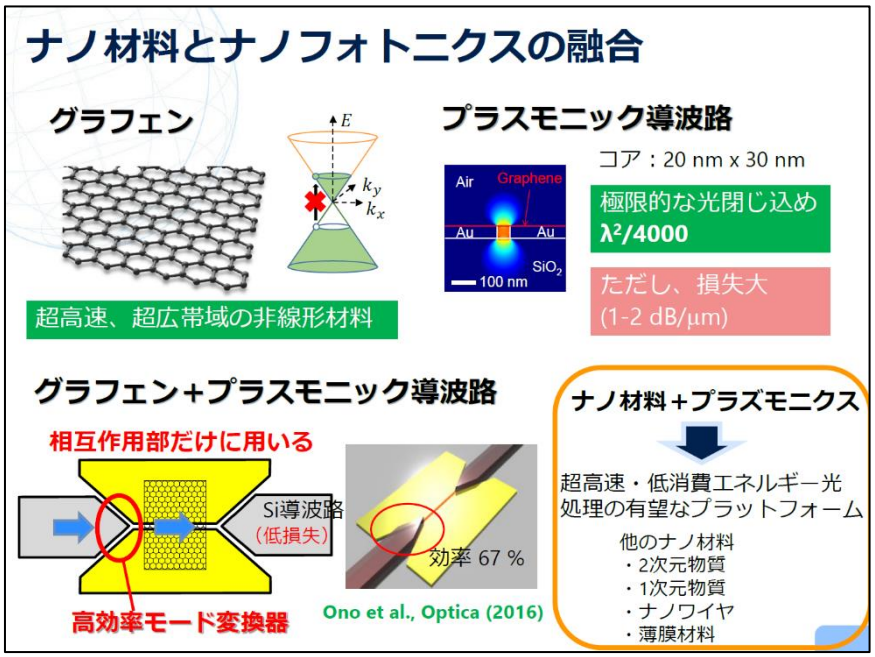


図 5-1-2　ナノ材料とナノフォトニクスの融合

このようにナノ材料とプラズモニクスをうまく融合させることで様々な新しいことができるのではないかと感じている。グラフェンだけではなく新しい二次元物質やナノワイヤなどの一次元物質のナノ材料を組み合わせる方向性が今後も重要になるのではないか。

もう一つの新しい流れとして、ナノフォトニクスを用いて光電変換デバイスのキャパシタンスを非常に小さくすることに成功した例について紹介する。従来の光電変換デバイスのキャパシタンスは、CMOS トランジスタのゲート容量と比べて 1 桁～2 桁程度大きかったが、我々の成果は従来よりも 1 桁～2 桁小さい 1fF レベルを達成している。これによって光電変換効率を飛躍的に向上させることが可能になり、通常、光集積回路の中で最も消費エネルギーが大きい OE 変換（約 400fJ/bit）に対して、今回の低キャパシタンスの光電変換デバイスでは消費エネルギーを 1fJ/bit 程度（数百分の 1）まで小さくすることができる。

EO 変換に関しても、フォトニック結晶で作った変調器を用いることでキャパシタンス 1fF 以下、消費エネルギー42aJ/bit を達成することに成功し、従来と比べると 20 分の 1 程度の小さな消費エネルギーで動く。

このような光電変換効率を上げることで、様々なパラダイムシフトを起こす可能性を秘めてい

る。例えば、小型の受光器と EO 変換する変調器を電気的に接続したデバイスを考えると、受光器に光を入れるとその出力で変調器がドライブされて青の光を変調することが可能になる。外部から見ると光の三端子デバイスになっており、光トランジスタと呼ばれるものができる。このような構成で光トランジスタができることは前から知られていたが、通常のデバイスで作ると光電変換効率が非常に悪かった。そこに小型デバイスを組み合わせることで全体として 100Gbit/s の高速動作、かつ、消費エネルギー1～2fJ/bit にすることができる。さらに光のゲイン信号の利得も出る。

光電変換効率が上がることで様々なことを考え直すきっかけにもなる。従来、光電変換とは変換するたびにエネルギーを消費するうえ、遅延も出てしまうため、数を減らしたいというのが常識的な考えであったが、我々の成果のように効率が上がるとその考えが成立しなくなる。非常にファインなスケールで光電変換を行う意味が出てきて、その結果、図 5-1-3 に示す Optoelectronic Computing という考え方に繋がり、演算レベルでも光電変換することでペイする領域が出てくるのではないか。光を用いた新しい演算技術にも使えるかもしれない。

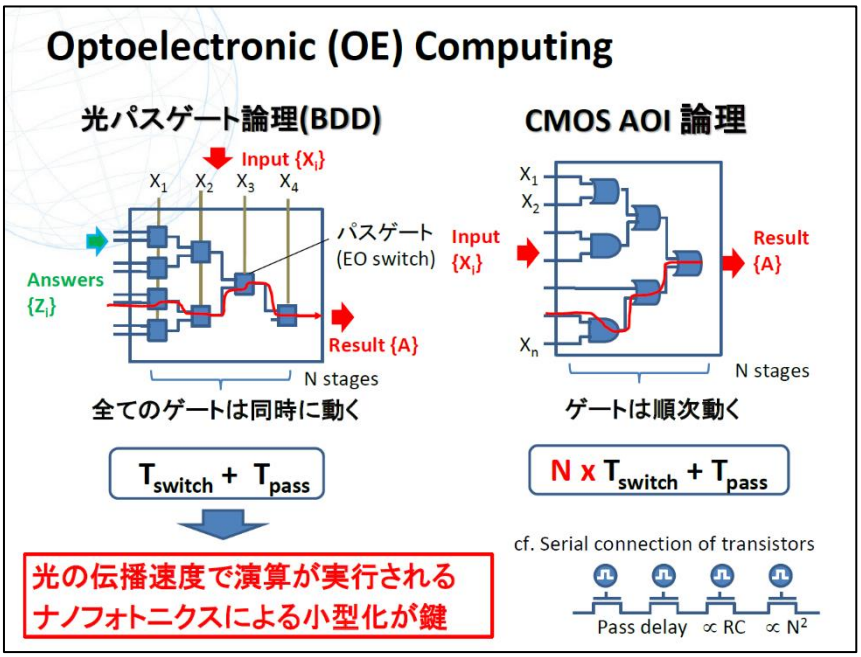


図 5-1-3　Optoelectronic Computing

その例として、光パスゲート論理について説明したい。従来の CMOS ロジックではゲートがシークエンシャルに並んでいて、シークエンシャルに動作していたため、全体の演算時間はスイッチング遅延の N 倍になっていた。一方、光パスゲート論理では、左側から可能なアンサーをあらかじめ入れておいて、上から入力信号に応じたパスに切りかわって結果として正答を出す。このようなタイプの演算方式を使うとスイッチング遅延が 1 回で済む。つまり、全部のゲートを同時に動かせるため、スイッチング遅延が積算しないのである。その結果、演算時間を決めるのはパス遅延、言い換えると信号の伝播時間となる。通常のトランジスタで作っても必ずしも高速化には繋がらないが、光を使うことで回路が小さければ光の伝搬速度に依存して高速化できる。これこそがナノフォトニクス向けの高速演算方式ではないかと感じている。

将来的には大量のデータ群に対して高速なレスポンスが求められることが想定され、我々はレイテンシーがボトルネックになると考えている。既にトランジスタレベルでのレイテンシーが飽和しているが、ここには本質的な限界があり、CMOS のゲート遅延は 10ps 以下にはできないと考えられている。我々としてはここに光を導入するメリットがあると感じている。つまり、光デバイスが小さくなれば演算時間にしても CMOS に勝てる可能性が出てくると考えている。

その一例として、我々は光の加算器を提案している。光の加算器をマッハ・ツェンダ型の 2×2 のスイッチで構成すると非常に簡略化できることを見つけており、1 段あたり 3 つの 2×2 のスイッチを使えば加算器ができ、CMOS よりも桁で速いものができるのではないかと考えている。まだ試作段階ではあるが、産総研と共同研究中である。さらに加算器だけではなく、積和演算やパターンマッチ、アナログ的なニューラルネットに関しても基本的には同じ方式で計算できると感じている。

加算器やニューラルネットの場合には、積和演算するような干渉回路を取り入れ、それに対して電気信号が入ってくる。次に光で何らかの非線形処理を行い、最終的には OE 変換をして PD で判定処理をすることを目指している。CMOS プロセッサと緊密にかつ電気的に集積されたものができると、従来の CMOS で作ったものの限界を超えられるのではないかという期待がある。ニューラルネット演算に対しては回路を小さくすることと、OE 変換効率を上げることがポイントになるであろう。

フォトニック結晶の新しい展開として、トポロジカルフォトニクスというものがある。もともとは電子物性の方からきた概念であるが、フォトニック結晶にある工夫を加えることで図 5-1-4 に示すようにトポロジカル不変量（Ch）が意味を持つ状態を作ることはでき、エッジ輸送や擬スピン、運動量空間のボルテックスといった新しい性質が生み出される。具体的にどんな応用に結びつくのかはまだ明らかではないが、少なくともアカデミックな世界では、従来にない新しい概念や提案が様々出てきていて、面白い分野になっている。基本的には物性物理にあるような、バンド構造が持つトポロジーがどんな新しい性質を導くかという領域になっている。

それに関連したもう一つのトピックとして、非エルミート光学と呼ばれている領域がある。これはゲインとロスがある対称性を持つような構造を作ると、新しい性質が出てくるといったものである。これまでゲインとロスは基本的には信号を大きくしたり小さくしたりすることにしか使われていなかったが、非エルミート光学ではゲインとロスを使って、光の伝播状態そのもので新しい状態を作ることができる。ゲインとロスは屈折率の虚部であるが、我々は特に屈折率の虚部も周期性を持つような新しいフォトニック結晶が面白いのではないかと感じている。

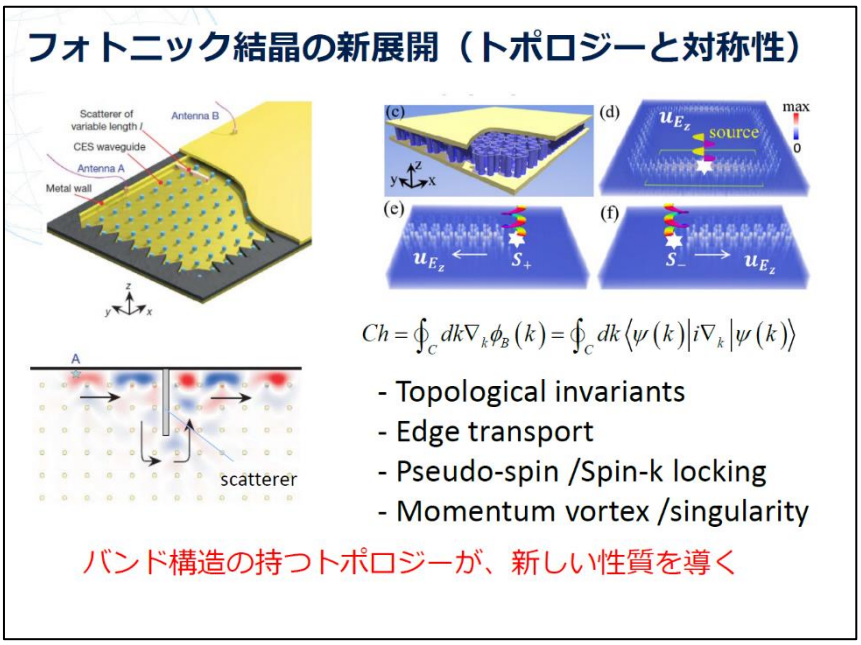


図 5-1-4　フォトニック結晶の新展開（トポロジーと対称性）

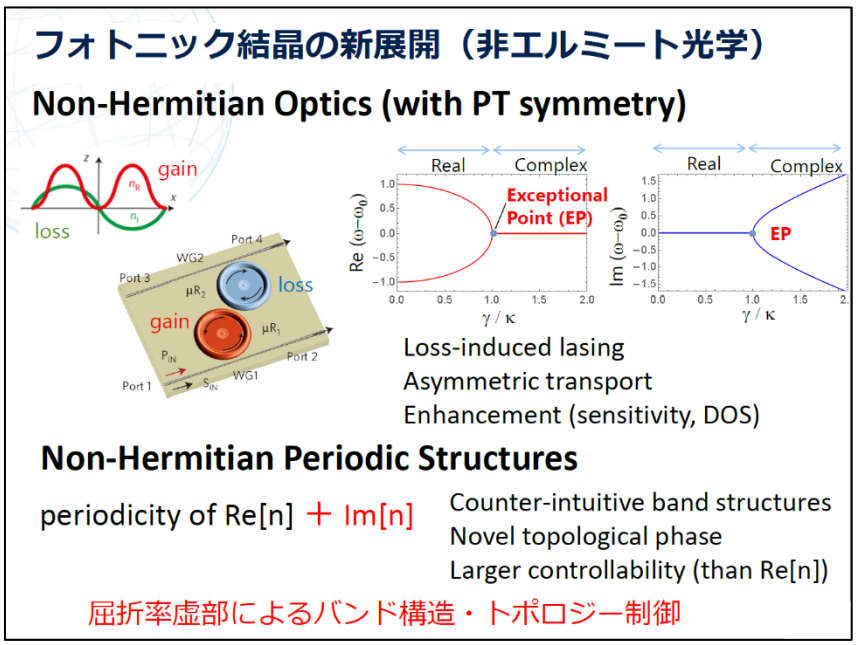


図 5-1-5　フォトニック結晶の新展開（非エルミート光学）

トポロジーを変えるという観点からは、異なる物質を組み合わせることでも面白いことができると考えている。例えば、相変化物質 $Ge_2Sb_2Te_5$（GST）を選択的にフォトニック結晶の上に積層すると、GST を相転移させることでトポロジカルな相転移を誘起させることができることを我々は発見しており、トポロジーを変えることが新しい切り口になるのではないかと考えている。

本日の発表をまとめる。ナノフォトニクス分野ではグラフェンのようなナノ材料をうまく組み

合わせる研究が世界中でホットになってきている。従来は小型化がナノフォトニクスの目標であったが、キャパシタンスも小さくすることで光の演算回路といった応用が拓けてくるのではないか。また、直接は応用に結びつかないかもしれないが、トポロジーや対称性を扱う領域が基礎科学としては重要になるのではないか。

【質疑応答】

Q: 非エルミート光学に関して、ゲインとロスを周期的に使うということは古くからやられていると思うが、本質的な違いはどこにあるのか。

A: 一番大きな違いは特異点が出てくるということである。トポロジーというのは、解析的に繋がらない特異点が出てきて、その周りにトポロジカルチャージが出てくることが本質であり、それゆえに特異点付近でいろいろと状態を変えると様々な興味深いことが起こる。ただ、それをデバイス応用するときにどれだけすごいことができるのかは未知数である。

Q: 光パスゲートに関して、ムーアの法則でトランジスタがどんどん小さくなって集積度が上がっていることとの関係はどうか。

A: 我々の場合に小型化する目的は集積度を上げるためではなく、遅延時間を短くするためであり、サイズとしては 100μm 以下であれば良いと考えている。集積度という意味ではシリコンには勝てないので、そこで競うのではなく、アクセラレータとして CMOS と協調するという立場である。

5．2　メタマテリアル・メタサーフェスの現状と展望

高原　淳一（大阪大学）

メタマテリアル・メタサーフェスに関する現状と展望に関して、私がこれまで研究してきた中で感じていることを中心に紹介する。メタサーフェスの分野が金属から誘電体へと大きく流れていること、誘電体メタサーフェスの応用の代表例であるメタレンズの現状、多重極子エンジニアリングの視点から誘電体のミー共振器に関する最近の興味深い進展について紹介し、最後に私の考えを述べる。

メタマテリアルというのは、20 年くらい前に負の屈折率を実現できる人工物質として大きな話題になった。当時はバルクの三次元メタマテリアルをどうやって可視光などの短波長域にもっていくかが課題であり、バルクの三次元ナノ構造を作っていたが、微細加工技術が追いついていなかったために様々な手法が提案されていた。マイクロ波領域ではできたとしても可視光領域ではうまくできなかった。主にプラズモニックなメタ原子を使っていたため、金属による光の吸収が大きく伝搬ロスも大きかったことが可視光でうまくいかない原因であった。

そのような状況の中でメタサーフェスの概念が生まれた。三次元であるメタマテリアルの二次元版と言えるものであるが、2011 年にハーバード大学の Capasso グループが実証してから一気に盛り上がった。原理は単純であり、メタ原子を並べて入射光の位相をコントロールすることで、通常では起こらない屈折や回折を起こすことができる。考え方としてはそれほど新しいものではなく、反射型回折光学素子の発展系と分類されるものであろう。

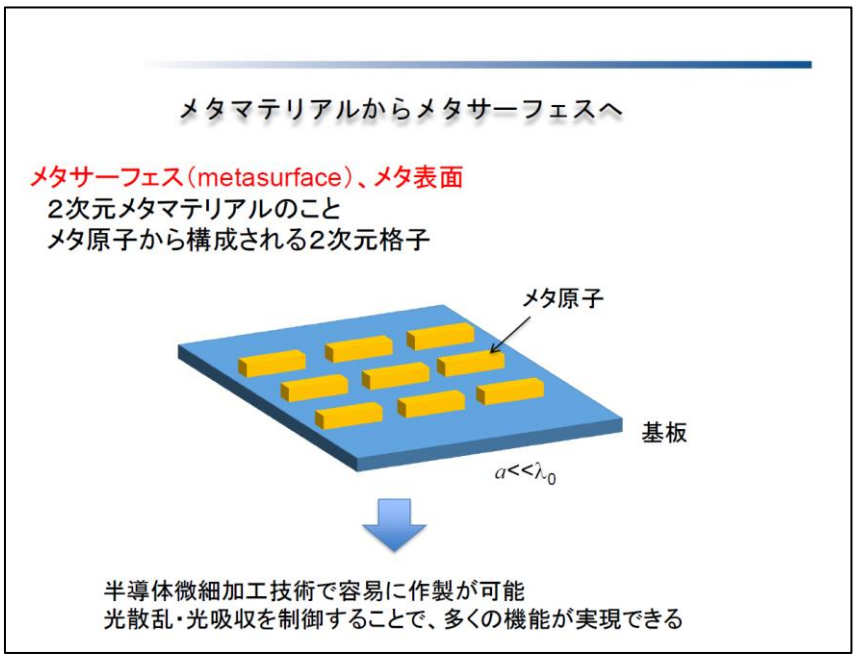


図 5-2-1　メタマテリアルからメタサーフェスへ

メタサーフェスは言葉の通り、メタ原子を二次元的に並べたものである（図 5-2-1）。メタマテリアルは人工的にバルクの屈折率（有効屈折率）をデザインしようとするもので、屈折率が誘電

率と透磁率の平方根のかけ算で表されることから、有効的な誘電率と有効的な透磁率を独立に扱うことで屈折率を自由に制御しようというものであった。一方、メタサーフェスは、1 個 1 個のメタ原子の散乱を制御しようとする考え方で、両者は言葉としては似ているが動作の考え方は大きく異なる。私自身は Capasso グループの真似をしたくなかったため、反射型プラズモニックカラーの研究を始めた。

反射型プラズモニックカラーは 100,000dpi という回折限界の解像度でカラー印刷ができるという特徴を持つが、我々は金属・誘電体・金属（MDM）構造のメタ原子を用いることにより、1 個 1 個のメタ原子がある特定の波長だけを吸収する完全吸収体になることを見出した。例えばアルミニウムとアルミナを用いると、図 5-2-2 のような様々な色を出すことができる。現在この研究は大日本印刷株式会社で継続して発展し、実際に 8K 解像度でのカラー印刷に成功している。

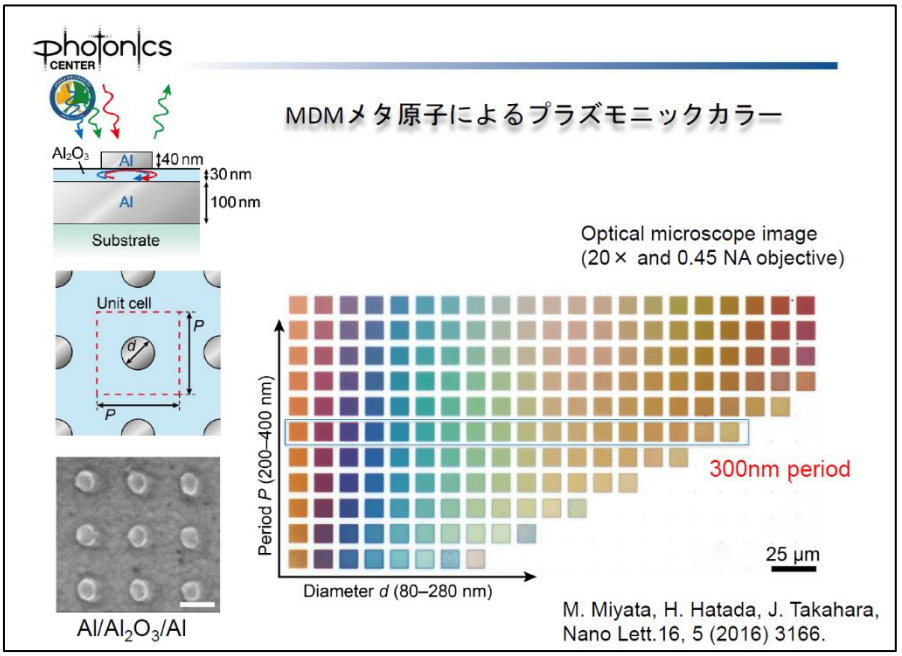


図 5-2-2　MDM メタ原子によるプラズモニックカラー

完全吸収体の他の応用としては、光をよく吸収するものは温めるとよく輻射することを利用した、狭帯域の赤外エミッターが考えられる。米国光学会（OSA）の機関誌 2017 年 11 月号の表紙に「Heat is the New Light」と書かれているように、熱と光というこれまで全く別の分野と考えられていたものが、完全吸収体の世界では相互に影響し合うものであったことから、世界中の研究者の注目を集めている。中赤外や可視のエミッターができるだけでなく、放射冷却でモノを冷やすことも可能になる。つまり、輻射の波長を中赤外領域の“大気の窓”に整合させることで、電力消費なくモノを冷やすことができる。

これは、従来課題であったプラズモニクスの大きなエネルギーロスを積極的に利用した例であり、印刷業界やアート業界、照明業界などこれまで光の分野があまり進出してこなかった新しい領域へ踏み出す一歩になるのではないかと考えている（図 5-2-3）。

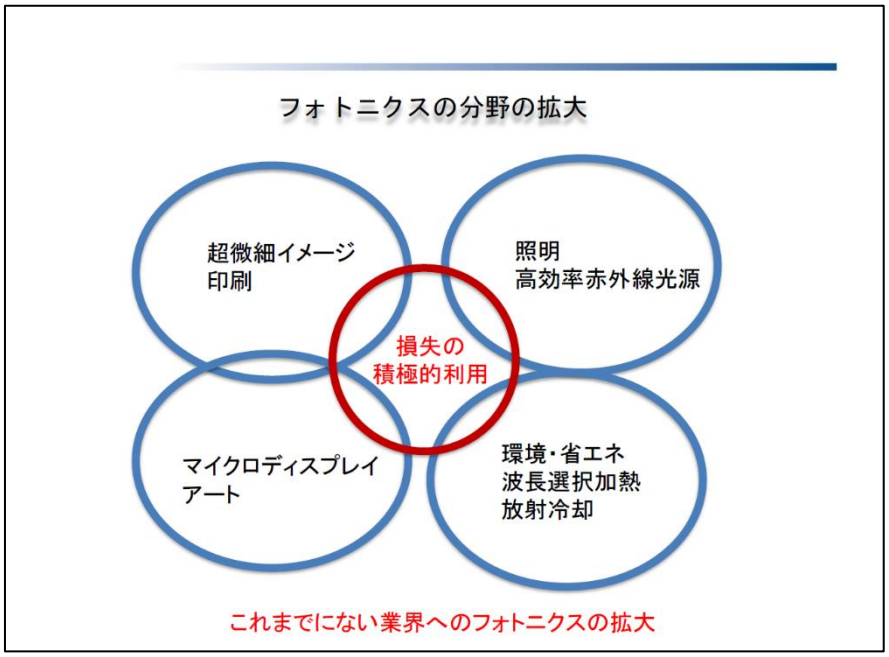


図 5-2-3　フォトニクスの分野の拡大

次に、誘電体メタサーフェスのメタレンズの応用について紹介する。先ほど述べた Capasso グループの反射型メタサーフェスでは金属を使っているために損失が避けられないという課題があったので、誘電体のみでメタレンズを作ったら良いのではないかと考えて始めた研究である。

2016 年に Science の表紙を飾って世界中でブームを起こすことになったのは、材料が TiO_2 で厚さが 600nm と極めて薄い高屈折率の誘電体メタレンズである。このレンズの場合、N.A.：0.8、透過率：66～68%と高性能であったので大きな話題になったが、過去にも TiO_2 を用いた Blazed-binary Lens で高屈折率を達成した例もあり、回折光学素子の延長線上の成果であるとも言える。

最近では色収差のないメタレンズも開発され、TiO_2 を使ったものや GaN を使ったものなどがある。それらの応用としては、日本製のカメラ用レンズやスマホ用カメラレンズと勝負するのではなく、軽くて小さなドローンなどに搭載する小型カメラ用レンズや三次元イメージングも兼ねた複眼カメラなどを対象にしている。

イメージングだけではなく、量子光学と併せた偏波変換応用として、スピンと軌道運動量のエンタングルメント生成が挙げられる。また、バレートロニクスとの融合という観点では、メタサーフェスの上に遷移金属ダイカルコゲナイトである MoS_2 を載せることで円偏光の分離に成功している。このように、メタサーフェスの研究は多岐にわたるが、基礎的な面では量子光学への展開や二次元ナノ材料とのハイブリッド化が個人的にも興味深い。応用面としては、可変のメタレンズや、紫外や中赤外などの普通のレンズが適用しにくい領域に積極的に切り込んでいくという方向がありえるのではないか。

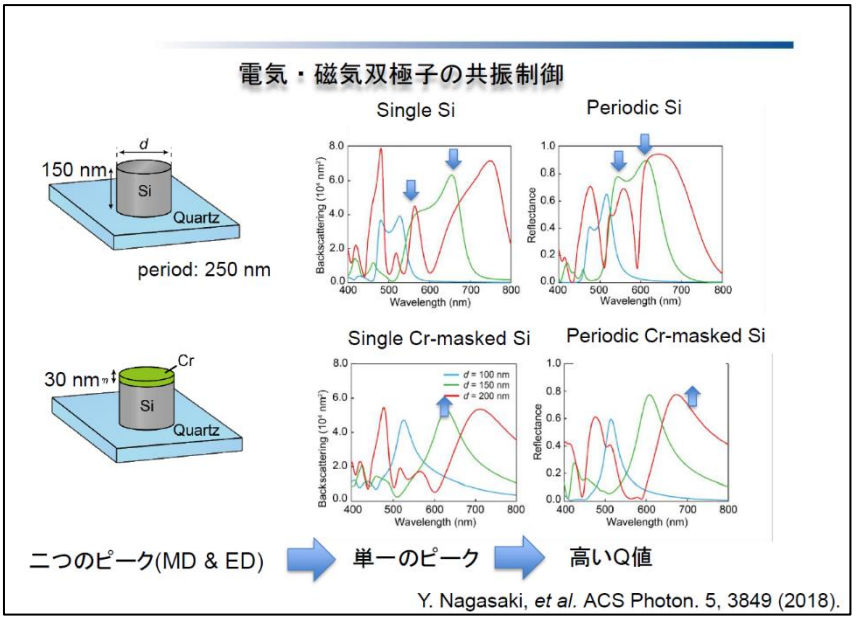


図 5-2-4　電気・磁気双極子の共振制御

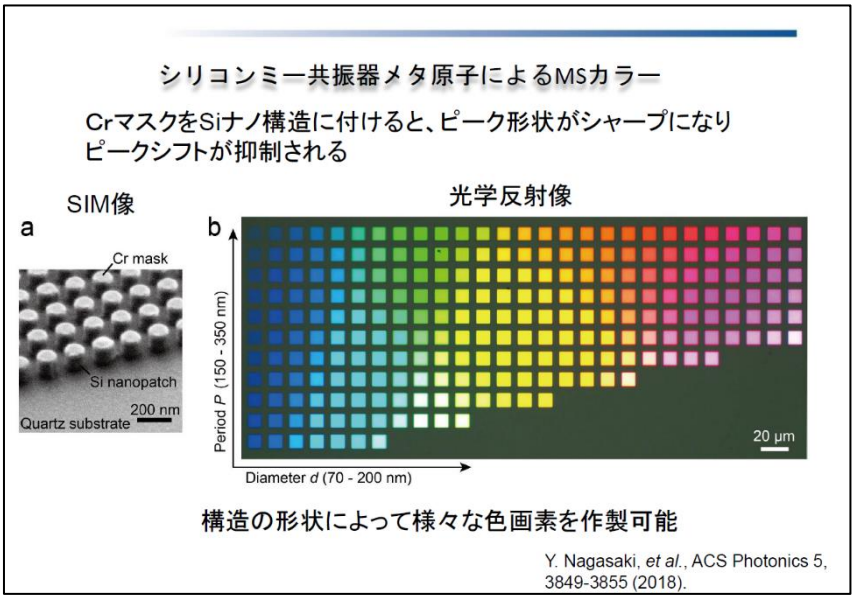


図 5-2-5　シリコンミー共振器メタ原子による MS カラー

誘電体のみのメタレンズでは、高屈折率誘電体球のミー共振を基本原理にしているため、電気双極子、磁気双極子、四重極子などの多重極子をコントロールすることが設計上は重要になる。単純なシリコン（Si）の箱では、電気双極子と磁気双極子の 2 つのピークが混じり合うだけであるが、Cr のキャップ層をつけることで電気双極子の位置をコントロールできるようになり、磁気双極子と併せることでピークをシャープにすることができる。これにより綺麗な色を出すことに成功している（図 5-2-4、図 5-2-5）。これによって、プラズモニックカラーと比べて色域がかなり拡大した。綺麗な色で印刷ができるという点で、多重極子を制御する多重極子エンジニアリングという視点が重要になっていると考えている。実際に、ミー共振器を用いて電気双極子と磁気

双極子のそれぞれの位相を直交させることで、ある特定の方向だけ散乱光を出すことができ、指向性のコントロールが自在にできるようになっている。

最後にまとめる。メタマテリアルの本質は負の透磁率を達成したことであるが、これは光の周波数域で磁場をコントロールしていると言える。メタサーフェスのミー共振器の例でも磁気双極子を用いて磁場の自由度をコントロールしている。トポロジカルフォトニクスも、元々は強磁場中で発現する量子ホール効果のエッジ状態をいかに光の分野に適用するかという発想から始まっており、やはり磁場が大きな役割を果たしている。これらのことから、磁場をどのように利用するかが光分野の大きなトレンドになっていると感じている。

【質疑応答】

Q: メタサーフェスに誘電体を使ったという話であったが、結局のところは回折格子であると考えてもよいのか。

A: 我々が構造色の研究をしているときに一番気にしたことは、回折格子にならないようにすることであった。周期を変えても色は変わらないよう、つまり、周期性をなるべく使わないよう、隣接する 2 つのメタ原子間の結合が無いような設計をしている。構造は一見すると回折格子に見えるかもしれないが、回折による干渉の効果は使わないようにしており、メタ原子 1 個で性質がほぼ決まっている。メタサーフェスと周期性を用いているフォトニック結晶とは明確に区別するようにしている。

Q: メタサーフェスとは、回折格子でいうところの 1 個のエレメントの形と回折の組合せと考えてもよいのか。

A: 1 個 1 個のエレメントは位相の遅延を制御しているだけで隣と結合していないため、回折格子とは異なる。

5．3　量子カスケードデバイスの進展

枝村　忠孝（浜松ホトニクス）

ここでは 2 種類の新しい量子カスケードデバイスを紹介する。ただし、どちらも現時点では、必ずしも具体的な応用が見えているデバイスではない。

一つ目のデバイスは、テラヘルツの量子カスケードレーザ（Quantum cascade laser, QCL ）である。QCL は半導体量子井戸構造の中のサブバンド間電子遷移を使った中赤外用の半導体レーザで、量子準位を使うということと、超格子構造がカスケード結合されているということで、量子カスケードと呼ばれている。弊社においては、通信帯のレーザで一般的に使われている材料であるインジウム・ガリウム・ヒ素とインジウム・アルミニウム・ヒ素の超格子を MOCVD で成長させている。成長総数は約 1,000 層で、高分解能 TEM により、設計どおりできていることを確認している。

既存製品としては、図 5-3-1 のようなものがある。CW の DFB レーザとしては、平均出力で 10 mW 程度、波長のバリエーションとして 4.3 μm～7.73 μm までのラインナップがある。中途半端な波長に見えるが、それぞれ大気中ガス分子に特徴的な吸収波長に合わせて製品化している。また、「シングルモードで波長掃引したい」という要望に応えた製品もある。これは MEMS 回折格子を搭載した外部共振器のモジュールで、中心波長は 9 μm に対し、200 cm^{-1} ぐらい掃引できる。単一のデバイスでこれだけ振れるのは他になく、世界最高の性能である。これらが、必ずしも産業化、事業化に結び付いているわけではないが、学会賞を受賞するなど、技術的には高く評価されている。

図 5-3-1　製品化されている QCL

これから紹介するテラヘルツの量子カスケードレーザについては、昨今話題にはなるものの、実際何に使うかというキラーアプリはまだ出てきていない。その大きな理由としては、室温において電流注入で動作する半導体光源がないことが大きな問題だと考える。先ほどの製品例で示した量子カスケードレーザは、中赤外波長では温度 400 K 以上で問題なく発振するが、テラヘルツ

領域で発振させるためには液体窒素温度ぐらいまで冷やさないと難しく、連続発振させるためには液体ヘリウムぐらいまで冷やさないと難しい。

「研究用途なら検出器側も冷却が必要なので特に問題はない」という意見も聞くが、昨今のヘリウムの入手難を考えると、液体ヘリウム冷却が必須となると気軽につかえないケースが多くなると思われる。

ここで紹介するテラヘルツ QCL は室温で発振するレーザデバイスである。 通常のサブバンド間遷移では、室温発振の実現が難しいと予想されたことから、図 5-3-2 に示すように我々は非線形光学効果の差周波発生（Difference Frequency Generation, DFG）の利用を試みた。量子井戸構造の中で非線形光学効果が発生するということは、非線形光学を扱う人間には古くから知られている。これを利用して、1 つの活性層内で 2 波長が発振するような構造を作り、同一導波路内でミキシングすれば、差周波としてテラヘルツ波を出すことができる。勘違いされることも多いが、2 台の QCL を用意してそれを非線形光学媒質で混合しているのではなく、発振と差周波発生を 1 つの活性層の内部で行っている。

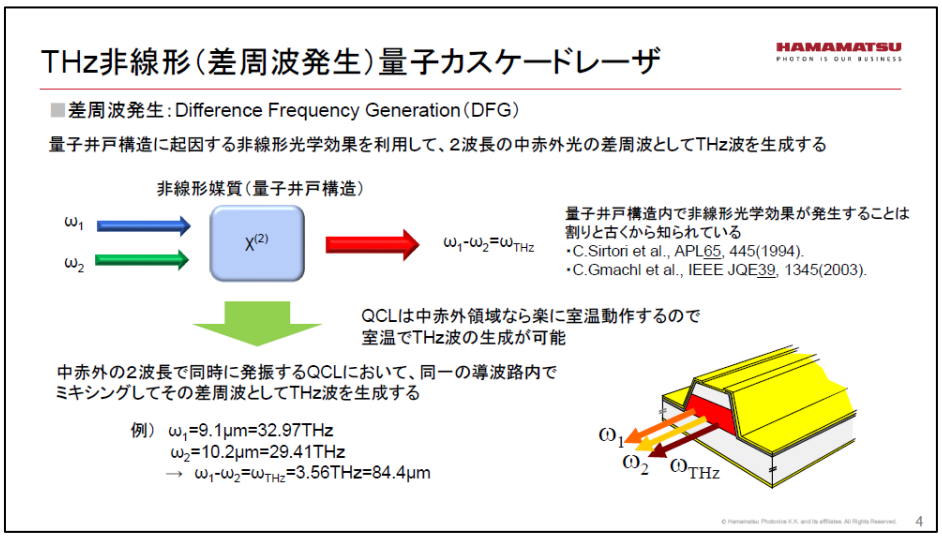


図 5-3-2　差周波発生により THz 発振する量子カスケードレーザ

もう少し具体的に述べると、2 本の上位準位から複数の下位準位に遷移するように準位構造を設計し、この下準位間のエネルギー差をテラヘルツに共鳴するように調整しておく。各遷移のダイポールモーメントの積で、非線形感受率$\chi^{(2)}$が与えられるため、非常に巨大な$\chi^{(2)}$を得ることができる。実際、固体レーザの波長変換に使う非線形光学結晶と比較すると約 3 桁から 4 桁大きい値になる。量子井戸内で 2 波長を発振させるために、1 つの波長に関しては、DFB グレーティングを切ってそれによって発振させ、もう 1 つの波長については劈開両端面のファブリペローモード（マルチモード）で発振させる方法をとる。その差周波がテラヘルツ波として取り出される。

図 5-3-3 が実際のデバイス特性である。シングルモードで立っているのが DFB に相当する発振で、マルチモードで発振している方がファブリペローモードにあたる。これのそれぞれの差をとっているため、右のテラヘルツのスペクトルも、中赤外のマルチモードスペクトルを反映した広帯域なテラヘルツ波となっている。図からわかるように、1THz から 3 THz ぐらいまで余裕で発

振しており、1 オクターブ以上のブロードバンドテラヘルツ光源ということになる。

出力については、ピークで 0.2 mW 程度であり、これを Duty10%で動作させると、平均出力で 10 μW 程度となる。10 μW を非常に小さく感じる人もいるが、この程度の出力があれば、室温で動作する熱型の検出器で十分に検知できるため、光源および検出器が室温での測定が可能になる。

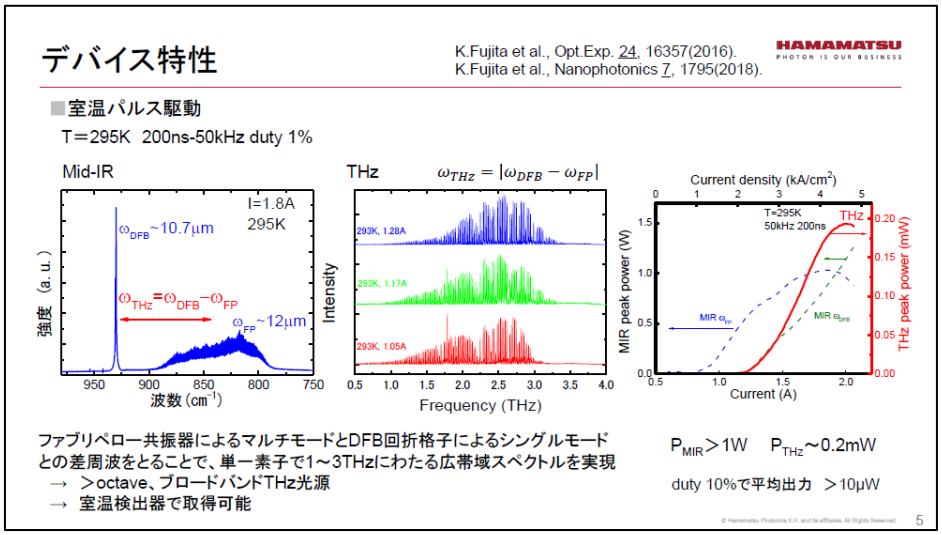


図 5-3-3　THz QCL のデバイス特性

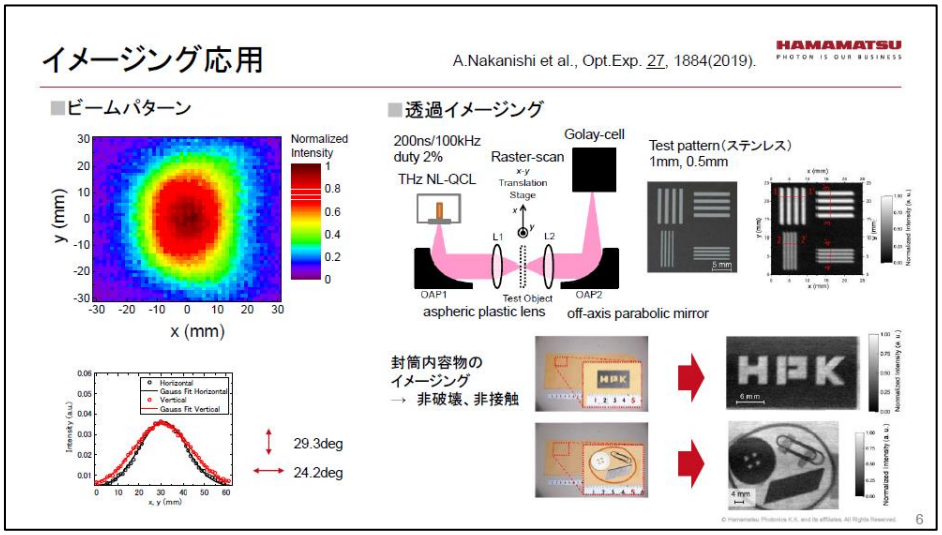


図 5-3-4　THz QCL を用いたイメージング

図 5-3-4 に、作製した THz 光源を用いた透過イメージングの結果を示す。光源は室温動作させ、検出器として熱型検出器の Golay-cell を用いた。実験環境は自由空間であり、パージも何もしていない。中心にサンプルを置いて XY 方向に動かすことで透過のマッピングをしている。右上のテストパターンについては、1mm ピッチなら十分解像できるが、0.5mm になると少し判別しにくくなる。その程度の長さになるとかなり波長に近づいてくるので、リーズナブルな結果だ

といえる。

封筒の透過像が右下であり、THz 波がブロードなために様々な透過吸収を見ていることになる。例えば、クリップをとめているテープに対してもコントラストがついて見えていることがわかる。これに実際にどのような用途があるか議論はあるものの、光源と検出器を含め、すべてが室温で動くことはデモンストレートできた。また、長波長側については、現在 670 GHz（波長にして 450 μm）程度までレーザ発振を確認している。室温電流注入の半導体レーザとして、これだけの長波長が実現できた例は他にない。

次に、二つ目のデバイスである量子カスケード構造を用いた赤外光検出器について紹介する。中赤外の検出器としては、水銀カドミウムテルル（Mercury Cadmium Telluride, MCT）や量子井戸型（Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP）などがよく使われるが、弊社は水銀の環境影響を考慮して MCT の生産を中止している。また、QWIP に関しては液体窒素冷却が必要ということであまり汎用性が無いように思われる。

QCL を検出器に使えないかという発想は当然あり、実際に QCL 構造に光を入射させると、検出器として動作する。非冷却であり、バイアスをかけなくても動き、しかもサブバンド間遷移を使っているため高速動作するということで、非常に魅力的な検出器になることが期待された。しかし、カスケード構造だからといって、光電子増倍管のように信号が増倍するわけではなく、また、サブバンド間の遷移のため感度が非常にピーキーであるという欠点もある。さらに、遷移の選択則によって面型の入射ができないため、グレーティングをつくったり、何か散乱体を入れたりして一工夫が必要なため、提案した当初は「そんなもの使えない」という反論が多かった。ただ、「QCL と感度ピーク波長に合った検出器とをセットで使えば、感度がピーキーでも構わない、むしろ光るところしか感度がないのだからそのほうがいい」という考えや、面型入射ができない問題も「何も面から入れる必要はなく、レーザと一緒に劈開して劈開端面から入れればいい」という発想の下で、開発を行ってみたところ、問題なく室温で動作し、300Kでも十分な感度があるものを作ることができた。

図 5-3-5、図 5-3-6 に応答速度を計測するために行ったヘテロダインビートの実験方法と結果を示す。DFB の QCL を 2 台使い、1 台の波長を固定してもう 1 台の波長を電流注入で変化（1 cm^{-1} 未満）させ、それを混合してそのビート信号を観測するという実験である。図 5-3-6 において、3 dB ダウンをカットオフとすると、5 GHz あたりがカットオフ周波数となっている。通常の MCT では、かなりよい結晶を持ってきても 1 GHz に届かず、普通の市販品だと、せいぜい数百 MHz ぐらいであることから、桁違いに速い検出器となっていることがわかる。

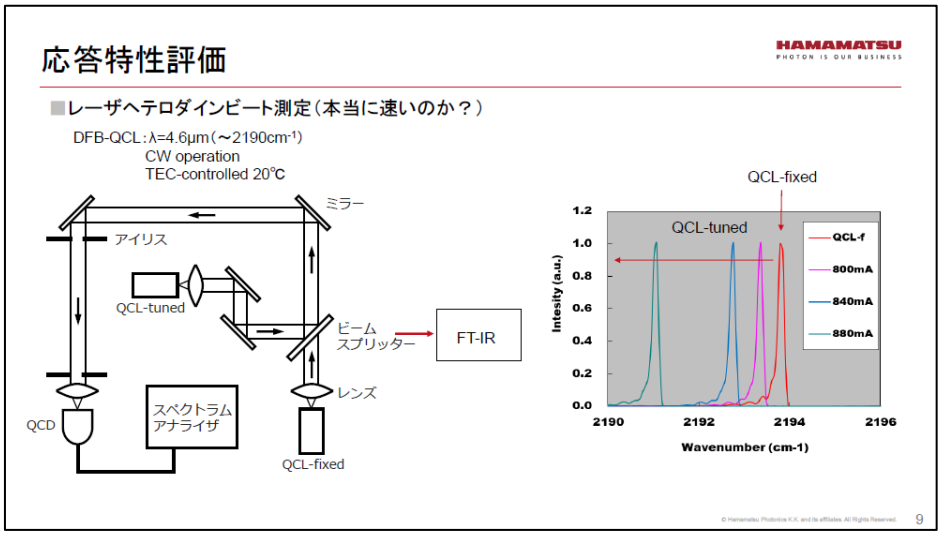


図 5-3-5　量子カスケード検出器の応答速度計測法

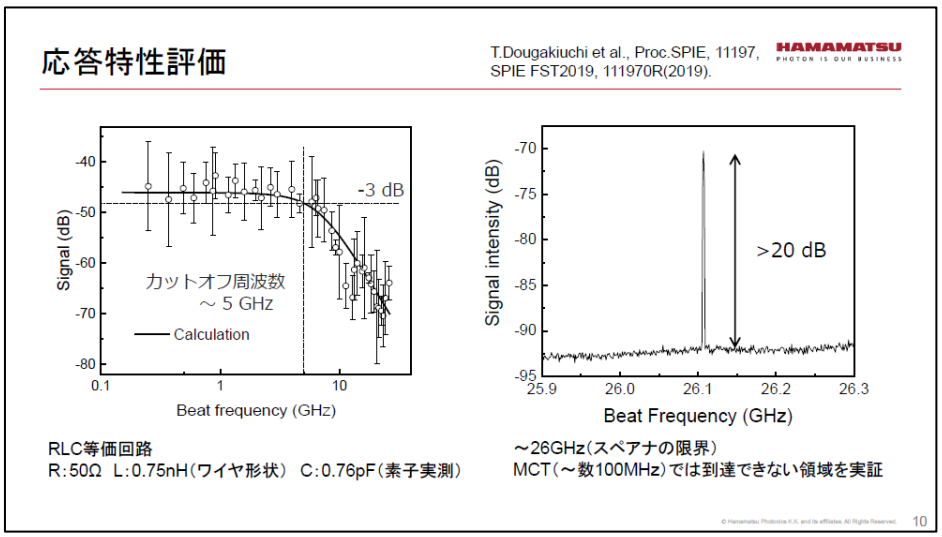


図 5-3-6　量子カスケード検出器の応答速度

図 5-3-6 に示したのは今年の夏のデータだが、現在ではさらに進んでいて、3dB ダウン のカットオフ周波数は 10 GHz ぐらいまで到達しており、26 GHz での S/N 比も 20 dB以上ある。26 GHz は、測定に用いたスペクトラムアナライザーの限界であり、検出器の限界値はさらに高いと考えられる。

以上をまとめると、テラヘルツの非線形光学を使った量子カスケードレーザで室温動作を達成し、長波長側は 450 μm までの発振を実現した。室温でイメージングも可能であることも確認した。量子カスケード検出器については、ギガヘルツ以上の応答速度を実証した。これらは今まで見たくても見えなかった世界なので、これを使った今までなかったセンシング応用が開かれることに期待している。

【質疑応答】

Q: テラヘルツレーザの製品化の計画はあるのか。

A: 今、製品化に向けて、試作から製品に落とし込む段階である。

Q: 中赤外量子カスケードレーザは非常に高価だが、安くなるのか。

A: 今はチップで CW が 60 万円～70 万円、パルスで 30 万円ぐらいである。「量産化したら安くなるか」との質問をよく受けるが、確かに安くはなるものの、シリコンの CMOS ロジックやメモリのような量産効果、大量生産で 1 個何円になるようなことはない。安くなるとしても、おそらく 10 万円～20 万円くらいではないかと思われる。検査工程が大変であり、どうしてもその部分のコストが下がらない。

Q: 波長可変にはならないか。

A: 図 5-3-1 にあるように、外部共振器で波長を可変にする製品を出している。

Q: 室温でテラヘルツレーザが動くことは素晴らしいことだが、世の中に中赤外域ほどの用途がテラヘルツ領域にはないように見える。御社の発表に対して「これに使いたい」といった反応があったのか、差し支えない範囲で教えてもらいたい。

A: テラヘルツのキラーアプリがないというのは、そのとおりだと思う。新聞発表に対して反響はあるが、具体的にこれに使いたいというのは、今のところない。

Q: 浜松ホトニクスの規模の会社は、今の QCL 市場で十分食べていけるのか、利益を上げていける状況だと思っていいのか。日本国内でこのような尖った技術をやっていくためには、何が不足しているのか。関連した話があれば伺いたい。

A: 事業ということに関しては、今のところ利益は出ており、社内でもやめろとは言われない。ビジネスとしてそれほど大きくはないが、成り立っている。海外勢との競争に関しては、我々がエピタキシャル成長から応用のデモンストレーションまで全て 1 社でやっているのに対し、海外勢（特にアメリカ）などは、赤外域に軍事予算が大量に投入されているため、はっきりと規模が違う。研究開発をやっていくにも、まともに向こうと張り合っていくのは相当難しい。正面から戦ったら勝てないので、差別化、例えば、欧米ではあまりやられていない波長などを狙っている。ただ、相手の資金力が莫大なので、1 社では厳しいところはある。

Q: 日本では防衛装備庁など、防衛省関係、あるいは DARPA の日本向けファンドがかなり R&D 投資をしようとしているが、大学ではなかなかできない状況にある。御社のような企業に共同研究の打診が防衛省あたりから来なのか。

A: テーマによっては無くはないが、先ほど述べた状況を変えるほどではない。弊社として防衛にどれだけ突っ込んでいくかというところも関係する。

5．4　光コムの進展と分光応用

岩國　加奈（電気通信大学）

私は 2015 年に博士課程を修了した後、ポスドクを幾つか経て、2019 年に電気通信大学に着任し、現在は研究室を立ち上げているところである。私の話は、基礎研究寄りになる。

まず、図 5-4-1 に示すように、光コムの歴史的背景から説明する。光コムは 2000 年ごろに開発されたが、その 40 年ほど前の 1960 年ごろに初めてレーザー発振が実現している。最初はパルスレーザーから始まり、そのすぐ後に連続発振する CW レーザーが実現している。パルスレーザーは周波数安定度が悪いが、スペクトル帯域が広い。つまり、時間領域で見ると、パルス幅が非常に狭いという特徴がある。一方の CW レーザーは、帯域が非常に狭いが、周波数安定度が非常に高いという特徴がある。パルスレーザーと CW レーザーが開発された後は、それぞれの特徴をより強化する方向に研究開発が進展した。つまり、パルスレーザーでは時間幅を短く、CW レーザーでは周波数安定度を高める方向性であり、全く異なった目的、目標に向かってそれぞれに発展していった。これに対し、光コムは、時間幅の狭さと周波数安定度の両性能を持ち合わせており、その誕生は第二のレーザーの発明とも言われる。

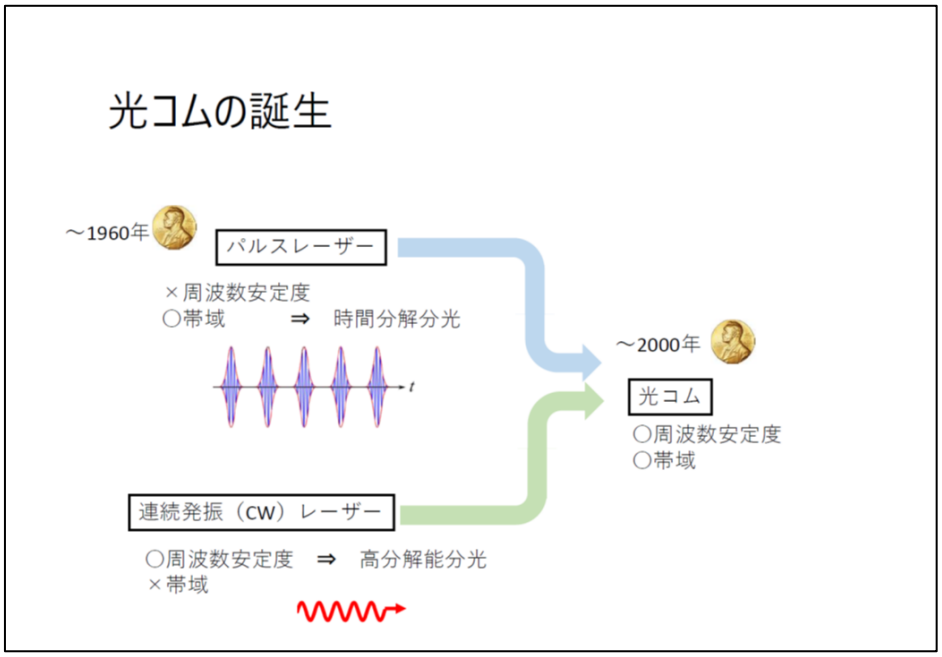


図 5-4-1　光コムの歴史的背景

光コムの出力は、時間領域で見るとパルス列、これをフーリエ変換すれば、発振モードが等間隔に並んだスペクトルとして得られる。このスペクトル形状が髪の毛をとかす櫛のようであることが光コムと呼ばれる理由である。光コムのある任意の n 番目のモード周波数は、この繰り返しの間隔、いわゆる繰り返し周波数 f_{rep} とオフセット周波数 f_{ceo} の 2 つのパラメータで書き表され、その両方ともマイクロ波領域であるので、非常に精密に測定することができる。光コムが開発される前は、光周波数の計測は非常に難しかったが、光コムのこの 2 つのパラメータさえ測定すれば、全てのコムのモードに絶対周波数が値づけられる。その意味で、光コムは光周波数の物差し

として使われる。例えば、CW レーザーの周波数は、この周波数と最も近いところにあるコムモードとの差の周波数 f_{beat} を測定すれば、12 桁ぐらいの精度で決めることができる。

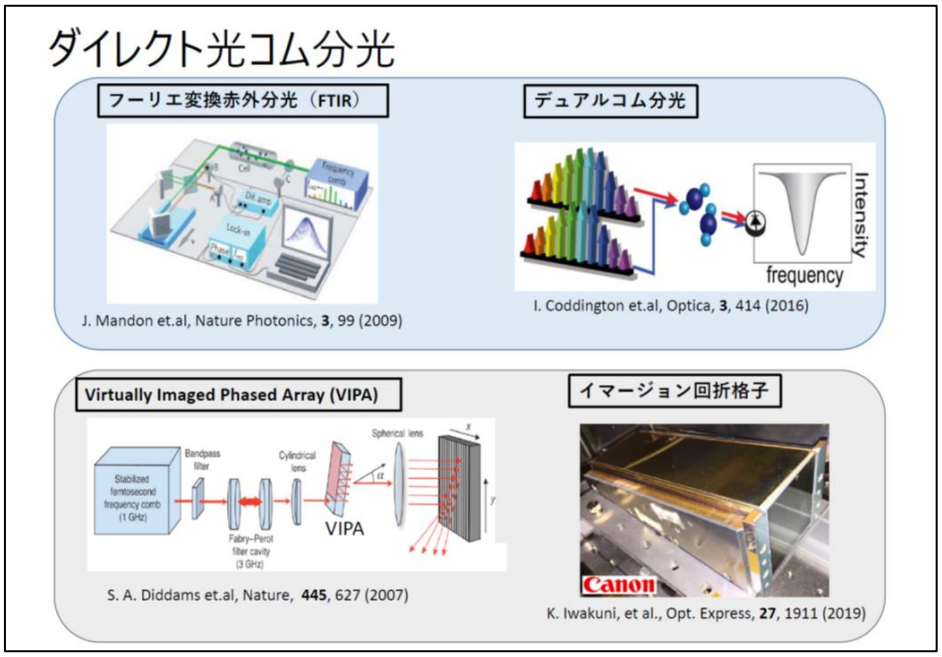


図 5-4-2　「ダイレクト光コム分光」の例

光コムは、開発当初は、チタンサファイアコムと呼ばれる固体レーザーを使った開発が進められていた。このチタンサファイアコムのアライメントは非常に大変で、かなり高度な技術を要し、また長時間の連続運転が難しいため応用も限定される。現在の主流となっているのは光ファイバーで構成されるファイバーコムであり、これはアライメントが比較的簡単で、かつ長時間の連続稼働も可能なため、ファイバーコムを使った周波数や距離の精密測定が非常に盛んに行われるようになった。日本などを中心に進む光格子時計の研究開発や、今年のキログラムの再定義にファイバーコムは大きく貢献している。一方、本発表で説明するのは分光応用である。光コムは、CW レーザーの周波数を精度よく測定できるが、現在では分光実験の光源そのものとしての利用が世界中で盛んである。

このように光コムを光源として使う分光手法は、ダイレクト光コム分光と呼ばれる。光コムでは、一つ一つのモードが 50 MHz 程度の等間隔で並んでいるため、普通の回折格子を使って各々のコムを分離することができない。したがって、ダイレクト光コム分光に使うためには技術的な工夫が必要である。

ダイレクト光コム分光の例を図 5-4-2 に示す。上の 2 つは基本的には同じで、どちらもフーリエ赤外分光法である。ここでは、自己相関関数あるいは相互相関関数を干渉信号として取得し、それをフーリエ変換することでスペクトルが得られる。一方、下の 2 つの手法は、Virtually Imaged Phased Array（VIPA）と呼ばれる高分散素子などを用いて、光コムの各モードを二次元空間に分離する。

上のデュアルコム分光について図 5-4-3 により説明する。デュアルコム分光は、名前から予想できるとおり 2 台の光コムを使った分光法で、1 台がシグナルコム、もう 1 台がローカルコムと

呼ばれる。ポイントはシグナルコムとローカルコムの繰り返し周波数がわずかにずれているという点である。このわずかなずれのために、シグナルコムのパルスがローカルコムのパルスによってスキャンされ、その結果として干渉信号が得られる。この分光法は、数学的には、マイケルソン干渉計を用いた FTIR、赤外フーリエ分光法と全く同じである。FTIR では、光源である白色光を 2 つのパスに分け、その片方のミラーを機械的に動かすことで干渉信号が得られる。デュアルコム分光法と同程度の分解能を FTIR で得ようとすると、ミラーの掃引を非常に長くする必要があるため、市販装置は 5 m ほどにもなる。一方、デュアルコム分光計により得られたスペクトルは、周波数分解能が 50 MHz、帯域が 140 THz であり、測定時間は数ミリ秒と非常に短い。

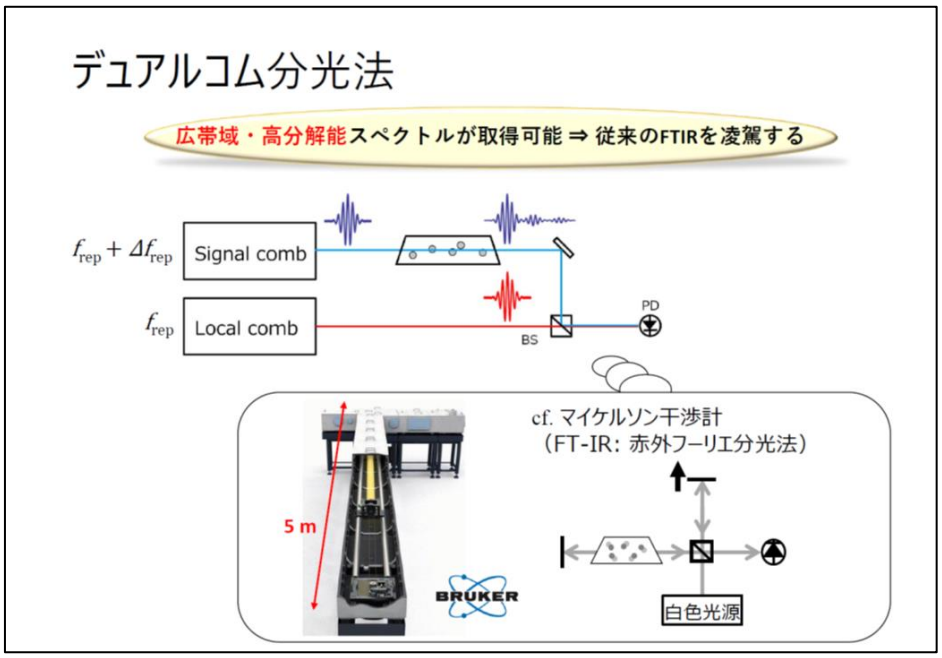


図 5-4-3　デュアルコム分光法の説明

ここでデュアルコム分光と FTIR とで性能比較を行う。デュアルコム分光計の場合は、観測帯域と測定時間がトレードオフになる。デュアルコム分光計というのは、残念ながら日本が最初ではないのだが、我が国における光コムの技術は非常に高く、それによりデュアルコム分光計の性能が格段に向上した結果、スペクトルの観測帯域幅を FTIR と同程度まで拡張することができた。FTIR では分解能と測定時間がトレードオフになるが、デュアルコム分光計では同じ分解能のスペクトルを 4 桁程度短い測定時間で観測できる。つまり、デュアルコムは従来の FTIR 性能を凌駕する可能性を有している。デュアルコム分光計は小型化が進んでいて、可搬型装置が市販されてきている。また、マイクロレゾネータと呼ばれる半導体技術も進んでおり、20 μm くらいの大きさで光コムが発生できる。小型化、堅牢化の進展により、例えば、デュアルコムシステムを飛行機や衛星、惑星探査機に載せて大気の分光を行うことが提案され、2 つの実験例がある。最初の例はアメリカの NIST で行われているもので、実験室のデュアルコム分光計のシグナルコムの出力を 1 km 離れた山の上に置いたミラーに向かって光を照射し、その反射光と実験室に置かれたローカルコムとの干渉信号を用いてデュアルコム分光を行う実験である。この実験では大気に含まれる温室効果ガスの検出に成功している。もう一つの例としては、天然ガスの採掘現場に可

搬型デュアルコム分光計を置いて遠隔操作し、ガス漏れの検知を行った実験である。この研究は NIST とコロラド大学によるコラボレーションであり、現在ではコロラド大学から立ち上がったベンチャーが実際の装置を販売しようとしている。

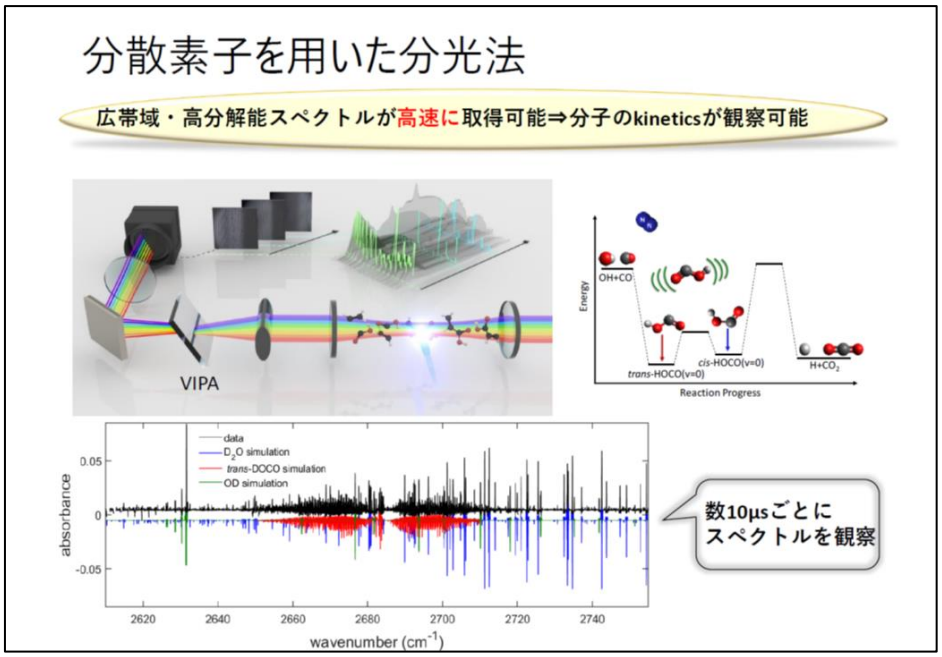


図 5-4-4　分散素子を用いた分光法

一方、図 5-4-4 に示すように、VIPA と呼ばれる分散素子を使った手法に関しては、今のデュアルコム分光よりも少し基礎科学よりな応用例を紹介する。分散素子を用いた分光法では、光コムのモードを空間的に分離する。この手法の特長は、先ほどのデュアルコム分光計では測定時間が数ミリ秒であるのに対し、さらに短い数 10 μs でスペクトルが得られることであり、これまで計測できなかった分子のカイネティックスが研究できるようになる。ここでは、大気内や燃焼過程でよく起こっている OH と CO から H と CO_2 を生成する反応を例に挙げる。この例では、最終生成物である CO_2 の生成レートが反応中間体として生成される分子の生成レートに依存することを定量的に明らかにしている。このように、ダイレクト光コム分光により数 10 μs ごとにリアルタイムでスペクトルを取得することで、化学反応のダイナミクスの解明が進んでいる。

ファイバーコムは主に波長 1～2 μm の近赤外領域で発生するが、それよりも波長が長い中赤外領域は分子の指紋吸収線と呼ばれる強い吸収が存在するため、高感度分光に適している。そのため、光コムの波長変換、特に中赤外領域への波長変換は非常に盛んに研究されており、今年 6 月の CLEO/EUROPE では中赤外レーザーや中赤外コムの発生原理などの講演が多く見られた。図 5-4-5 が中赤外コムの光源リストである。横軸が波長（波数）を表しており、近赤外領域の光コムから波長変換によって、3～10 μm 帯の中赤外コムを発生させられることを示している。

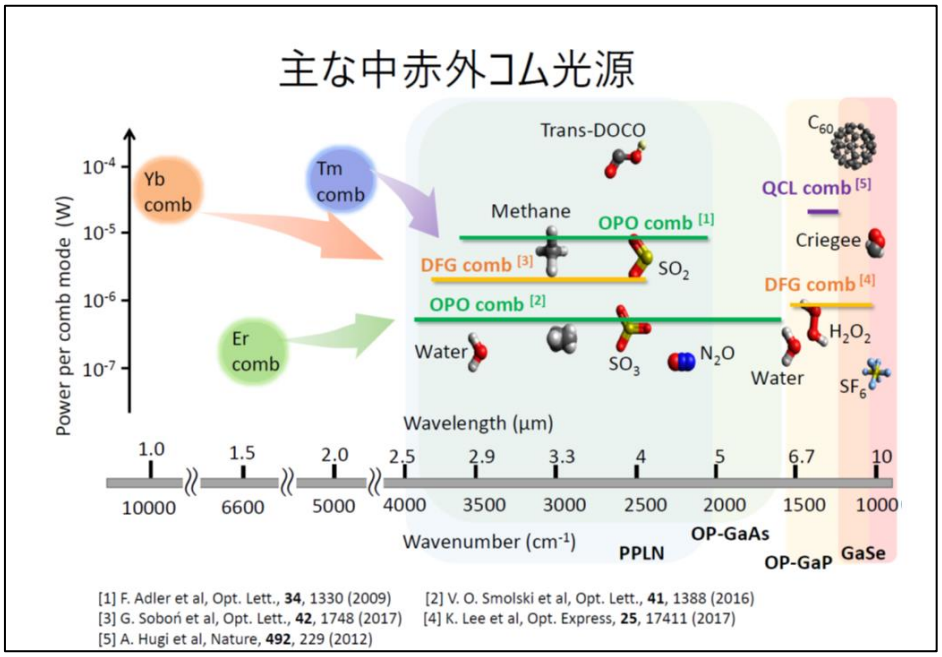


図 5-4-5　主な中赤外コム光源

中赤外領域の光コムを分光光源として用いることで、質量の大きな分子の精密分光ができるようになる。質量の大きな分子は、内部構造が複雑になり量子力学による解析が非常に困難なことから、これまで量子エレクトロニクス分野で研究対象の主流ではなかった。しかし近年では、分子冷却の技術が大きく進展し、大きい分子の内部状態を特定、制御しようという研究が始まっている。ここで示すのは、実際に中赤外ダイレクト光コム分光と冷却技術を組み合わせて、サッカーボールの形をした C_{60} 分子の分光スペクトルを取得した例である。このように、非常に大きい分子でも、2 原子分子などと同等に精密な分光測定ができるようになってきている。

最後にまとめると図 5-4-6 のようになる。光コムの初期開発はドイツとアメリカで進んだが、ファイバーコムが現在の主流で、この開発には日本の貢献が大きかった。というのも、ファイバーを用いたモード同期レーザーやファイバー増幅器の技術といったファイバーコムの礎となる技術が強いためである。光格子時計の例で知られるように、光コムを用いた周波数や距離の計測も日本が強い分野である。一方、光コムの小型化・堅牢化はアメリカ、ドイツなどに先を越されている。分光応用では、デュアルコム分光がアメリカ、ドイツで最初に始まり、日本も割と早い段階でこれに着手した。しかし、最初の結果が出たところで日本では研究が終わってしまい、今は欧米や中国が牽引している。波長変換についても同様に、日本は分光応用と同時に中赤外領域の研究にも着手したが、その後ストップしてしまった。最近になって再開しているようであるが、中赤外発生に必要な非線形結晶を中国、ロシアに握られているという点は問題である。アメリカは早くから中赤外領域に注目しており、様々な応用展開が着々と進んでいる。

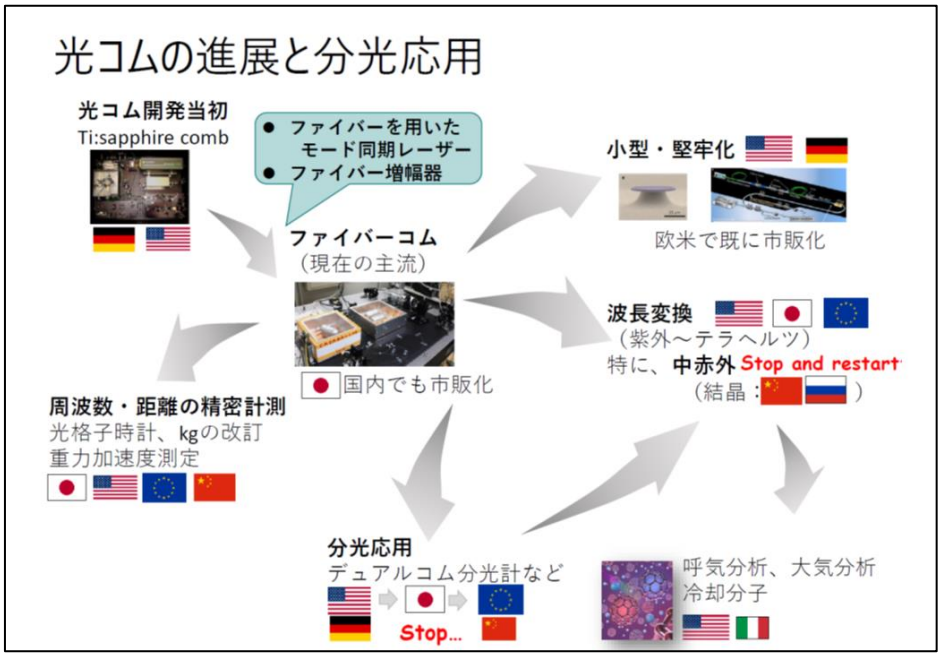


図 5-4-6　まとめ：光コムの進展と分光応用

【質疑応答】

Q: ファイバーコムの日本製品が良いから世界でも使われたという話があったが、なぜ今は停滞してしまったのか。

A: これは非常に大きな問題で、諸事情はあると思うが、少し野心に欠ける、高性能が得られたがために満足してしまった、などが理由であると思う。また、研究者が非常に多忙で、新しい技術への挑戦に必要な勉強ができないなど、時間的にも心理的にも余裕がないのかもしれない。

Q: 光コムがパーシャルコヒーレンシー光源として OCT（光コヒーレンストモグラフィ）に使われ出し、ビジネスとして結構成功しているという話を聞いているが、その方向での情報はあるか。

A: 全然、考えていない。

C: コヒーレンシーを自由に制御できるデバイスとして、光コムは非常に優れているので、そういう応用を考えると、まだまだ広がりがあると思う。

Q: 光コムの応用として高分解の赤外分光の話があったが、分子振動を非常に高い分解能で分光するのに、マイケルソン干渉計で 5 m の FTIR 装置ではダメなのか。

A: 分光できるが 5 m の大きさが必要ということである。測定時間が長くなるため、圧力など一定の実験条件での測定が難しい。

Q: 最近、ヨーロッパなどにおいて、QCL（量子カスケードレーザー）でもテラヘルツのコムが注目されているようだが、我々がやる価値があるか。

A: やっている人はいる。テラヘルツに何かキラーアプリケーションがあり、それをコムにすることで性能向上が見込めればいいと思うが、現状ではそういう話は聞かない。

Q: 欧米で小型化、堅牢化され、既に市販されているという話だったが、これは小型タイプのコ

ムか、それともマイクロレゾネータか。

A: 小型タイプのコムもマイクロレゾネータも市販されている。主に、計測分野への研究用途である。

6．総合討論

ファシリテーター：岩本　敏（東京大学、JST-CRDS）

【事前アンケートの回答整理】

このワークショップの総合討論を効率的に進めるために、事前に有識者にアンケート（４つの質問）を依頼していたので、このアンケートの回答を整理した結果について紹介する。

第 1 問：「最近世界的に注目されている、または立ち上がりつつある光の科学技術テーマで、学術上あるいは産業上で重要と思われるもの」

図 6-1 に回答を整理したものを示す。なお、この図も含めて以降の図では、大局的な視点や指摘が多かったものからグルーピングして順番に記載している。

大局的な視点として、地球環境問題の解決のための光科学技術の開発と貢献がある。応用だけでなく、地球的課題あるいは SDGs に貢献することを考えていくべきという指摘である。指摘が多かったものとしては、新たなコンピューティングあるいは AI 技術との関わりがある。また、光のイメージング技術、LiDAR、不可視化光学（見えないようにする光学）、中赤外の光源に関するものなども挙げられている。

個別の項目としては、応用としてのディスプレイ、量子もつれなどを使った計測技術、Radio over Fiber、メタサーフェスによる光学素子、分子冷却技術、トポロジーやキラリティなどの概念を取り込んだ光科学・技術、フォノン制御、新規の光機能材料、が指摘されている。

第 2 問：「その中で日本の強みとして今後も技術を継続していくべき光の基盤技術」

図 6-2 に回答を整理したものを示す。第 1 問と同様に大局的な視点として SDGs などを考えたときの基盤技術が挙げられている。また、多くの方から指摘されていたものとしては、様々なレーザー光源、レンズなどの基盤となる光学技術、光集積回路・通信基盤技術、高精度な計測技術があった。さらに、機能性の光材料についても指摘がなされている。

第 3 問：数年後のプロジェクト化を想定した「世界をリードするために、日本として強化すべき技術領域・応用領域（産業）」

回答で一番指摘が多かったものは３次元イメージングやバイオイメージングなどのイメージング技術である（図 6-3 参照）。次に多かったものは 5G や 6G に対応するような通信技術である。通信分野だけに留まらずコンピューター、様々な量子技術などへ利用可能な共通技術の重要性が指摘されている。さらに、小型・高出力・短パルスレーザーや深紫外の光源技術、計測技術の一つである非侵襲の医療技術、についても複数の方から強化領域として挙げられている。

個別の指摘としては、インフォマティクスを活用したデバイス設計、眼鏡型ディスプレイ、非線形光学・量子光学・近接場光学の駆使、既に投資されているものをうまく使うこと、などが挙げられている。

第 4 問：「どんなような体制とか仕組みで日本の技術を強化していけばよいか」

ここでは、異分野融合、人材育成、拠点形成、などの視点での回答をお願いした。一番多かったものは、研究開発拠点の形成に関するものである（図 6-4 参照）。この中には、ファブ機能や大

規模なシステム構築環境の提供、人間と光の関わりの総合的な研究、量子技術の拠点設置、といった意見もあった。

次に多かったのが公的資金の充実である。この中には、集中的に投資するだけでなく、裾野を広げるような資金援助、異分野融合の促進も大事といった指摘もあった。また、ベンチャーやスタートアップを支援することを複数の方が挙げている。これは大手の企業に頼らないで、大学発の新しい技術を製品・産業につなげていくことの必要性を指摘したものである。

さらに、これらは特に光技術分野に限ることではないが、研究者が研究時間をつくれる方策、技官の適切な配置、研究環境の整備などに関するものや、若手研究者のキャリアパスの充実などが挙げられていた。また、分散してしまった光学人材が協力して、古い技術から最先端の技術まで様々な研究を行える仕組みの構築が必要との指摘もあった。

事前アンケートの整理

①最近世界的に注目されている、または立ち上がりつつある光の科学技術で、学術上または産業上で今後重要と思われるものについて記入下さい。

- 地球環境問題解決のために光科学技術の開発と貢献（大気汚染、海洋汚染、伝染病、飲料水、地球温暖化、他）。日本の研究トレンドはいまだ高度成長時型の巨大産業支援と健康・長寿に中心がおかれ、世界の課題とは遊離してガラパゴス化してるように思える。

- 光の特徴を活用した新たなコンピューティング・AI技術（リザバーコンピューティングなど）
- 光アクセラレータ、光AI技術、光リザーバコンピューティング、意思決定、複雑系フォトニクス
- 光学定盤や極低温環境を必要としない社会実装可能な量子コンピューティング技術
- 異なる特殊計算エンジンを統合するフォトニック・インターポーザによるプラットフォーム技術、光ネットワーク、その制御技術。また、このプラットフォームを活用した革新的次世代コンピューティング・AI技術（Programmable Photonic Processor for quantum processing and ANN）および収容技術。これらのハードウエアとソフトウエア技術を総括した「フォトニクス・ドリブン・コンピューティング（仮称）」。
- AI技術を活用した光学設計（デバイス、適応光学など）

- 高空間分解能・高時間分解能・超広視野を実現する（生体）光イメージング技術
- LiDAR
- 環境計測，センシング技術
- 超軽量画像キャプチャリング技術（メタマテリアルやDOEなどのフラットレンズ技術、レンズレスカメラなど）。
- 不可視化光学：　メタマテリアルに拘らず、ありとあらゆる光学手段で物体を不可視化する技術
- 人間の感性・認知などの特性に最適な光制御技術。

1

①続き

- 赤外分光イメージング/呼気診断用中赤外光源技術
- バイオイメージング用小型・高性能パルスレーザー技術
- 2光子用フェムト秒レーザー：0.8-1 μm、3光子用フェムト秒レーザー：1-2 μm、光音響用ナノ秒レーザ：0.5-0.7 μm
- 量子もつれ光などを発生する新しい光源技術。ナノフォトニクスとの融合。

- 網膜ディスプレイなど眼鏡型ディスプレイ

- 量子もつれや量子ウォーキングなどの量子特性に基づいた物質・生物の光応答原理の理解と、これらを応用したデバイス・計測技術への展開（高感度、高S/N、リモート性の実現）。

- Radio over Fiber

- サブ波長構造を用いた誘電体光メタサーフェス等による光学素子

- 冷却分子、分子のレーザー冷却

- トポロジー・キラリティ—など新たな概念を取り込んだ光科学・光技術。

- 光音響だけにとどまらない光によるフォノン制御。

- 新奇光機能材料の開発。

2

図 6-1　事前アンケートの整理①

②日本の強みとして今後も技術を維持し発展させていくべき光の基盤技術について記入下さい。

・地球環境問題解決のための光科学技術の開発と貢献：大気汚染・海洋汚染、伝染病・衛生、飲料水、地球温暖化、安心安全、ほか

・先端レーザー光源開発
・可視領域の半導体レーザ技術とそれを活かした光基盤技術
（可視領域の干渉性がある光を活かしたアプリケーションに期待）
・深紫外・遠紫外レーザー（多波長、波長可変）
・可変波長レーザの波長範囲の拡大
・レーザー開発（CW、高出力パワー、波長変換）
・半導体レーザ製造技術
・半導体レーザーをはじめとする光デバイス開発。
・大面積・3次元加工技術

・光関連企業による基盤光学技術。
・レンズ等を用いた光学機器技術
・非線形光学デバイス開発。
・カメラ・ディスプレイなどで構築されたレンズ・光学設計・生産技術の技術伝承と次ステージへの展開
・光学技術、光学結晶技術、光半導体技術、波長変換技術、光導波路技術、波面制御技術（SLM）、MOEMS、光検出器、ファイバー技術、など、世界をリードする技術は多い。これらを統合し、システム化し、機能を生み出していくことが重要。

3

②続き

・光集積回路、光通信基盤技術
・ナノフォトニクス：　日本独自の目標の設定が必要と考える。
・ナノフォトニクス技術の実用化
・通信などで構築されている光エレクトロニクス、マイクロオプティクス技術。⇒量子技術の基盤となる。
・フォトニクス・ドリブン・コンピューティング創出につながる基盤技術。
－広帯域低電力低コスト光トランシーバ技術：化合物半導体とシリコンなどによる電子光・異種材料集積技術（コパッケージ技術）、及び、広温度範囲動作・超高品質集積型光コム配信基盤技術。
－ポスト5G時代に堪える光ファイバインフラ構築基盤技術。マルチコアを含む、超高密度光ファイバケーブル、超低コスト高性能光スイッチ技術各種、及び、光ネットワーク完全自動化技術。

・高精度計測技術
・精密計測、量子計測
・計測原理、加工原理、分析原理、表示原理の創出（以前は得意であった）
・高感度あるいは高速光検出器および撮像素子技術
・高性能（高褪色性，長波長化，多様なセンサー機能）な蛍光プローブ開発

・機能性光材料
・光科学と物質科学の融合領域（分光・加工・物性制御など）

4

図 6-2　事前アンケートの整理②

③世界をリードするために、日本として強化すべき技術領域・応用領域（産業）について記入下さい。（数年後のプロジェクト化を想定）

・3次元イメージング技術（ライダー，OCT，その中間領域など様々な領域で拡大させる）
・超軽量画像キャプチャリング技術：　ニーズが顕在化しているが、キラーテクノロジーが無い。システム志向での研究、開発が重要。
・トップダウン・アプローチからボトムアップ・アプローチによる大面積3次元イメージング・ファブリケーション・アナリシス技術
・非染色分子分析イメージング（赤外・近赤外・ラマン）
・ バイオイメージング領域では、生物・化学・物理学・情報科学の垣根を超えた融合研究を強化していく必要がある。化学・生物学による標識技術・プローブ技術、それを検出・制御するための光学技術、イメージング結果から情報を抽出するための情報科学が連携することが、最終的に医学・生物学で新しい知見を得る上で重要である。
・光技術を利用した非接触／非破壊／その場／リアルタイムセンシング
・真空、極低温、クリーンルーム、除振台のないアンビエント環境でのナノ計測・加工・操作・分析

・5G，6G対応通信技術
・量子技術：　コンピューター、通信、計測、マテリアルに共通の知識体系の構築、具体的な技術・産業の戦略的構築、X線の量子もつれ光発生源や検出器の実現などで世界リードする。
・フォトニクス・ドリブン・コンピューティング技術を具現化するプラットフォーム技術の、ポスト5G／6G時代を支えるエッジ・クラウド・インフラへの展開と、フォトニクス・ドリブン・コンピューティング技術の創出。

・産業利用に資する小型・高出力・短パルスレーザー光源技術の高度化（復興？）⇒国内でレーザー光源を調達・メンテナンスができる研究開発体制および学術・産業基盤の醸成
・深紫外光源・深紫外光学材料・深紫外検出器

5

③続き

・光技術を利用した非侵襲医療技術
・バイオ計測や診断よりも、治療への応用が求められる。（日本の医療・薬事の厳しい規制が課題）

・インフォマティクスを活用したデバイス，システム設計

・眼鏡型ディスプレイで3次元送受信網を構築

・非線形光学・量子光学・近接場光学を駆使：　光イメージング技術とその応用（特にバイオテクノロジーへの応用）。光圧制御技術とその応用（特に光化学反応制御などへの展開）。新たな概念の微細光加工技術（3Dプリンタなど）。

・すでに投資されているものをうまく使う
例）コンピューティング、自動車、バイオ等の技術を使った光技術。　光を日本の得意な物質科学のように考えられないか？
光の空間的な広がりの自由度は使いきれていない。光格子をつかったイオントラップのように、空間の自由度を使って何かができると良い

6

図 6-3　事前アンケートの整理③

④どのような体制・仕組みで日本の光技術を強化していけばよいか、異分野融合、人材育成、拠点形成などの視点も含めて記入下さい。

・光エレクトロニクス、光ネットワーク、データコム、コンピューティング、アプリケーションまでを俯瞰できる様々な専門性を有する人材の育成と、それらを垂直融合し、ファブ機能や大規模なシステム環境を提供する国主導による大型の研究開発拠点の構築。そこで開発された技術を統合するテストベッドを構築・運営し、参加研究者や参加企業が技術や革新的アプリケーションを持ち寄り、技術・人材・産業発展のスパイラル効果をも生み出すような仕組みを構築する。
・人間と光の関りを総合的に研究し、知識を発信する文理融合型研究拠点。
・デジタルトランスフォーメーションのようなことを考えたときに、使う人が作る仕組み：自由な発想で光を使ってもらう＋製造技術に技術・投資を集約する、という仕組みができるとよい。そのためには、「自由な発想で光を使う」例を作ること、それの受け皿となる製造技術＆技術者を作ることが大切。
・技術や資金が必要な量子もつれ光発生源や高速検出器の開発や共同利用を推進する量子技術の拠点を設置。量子もつれ技術研究の敷居を低くする仕組み、ナノフォトニクスとの融合、システム化に必要な従来技術（幾何光学設計など）の深化を目指すグループとの共存が必要。
・レーザー開発と材料開発などの異分野融合
・大学・企業連携を仲介するコンソーシアムの構築。

・光科学をサポートする公的研究資金の充実。
・異分野融合を促進するシステムの構築。研究資金の充実。
・研究助成制度の運用が硬直している。リスクのある研究を認め、研究の失敗を許し、予算執行の弾力性を高め、過度な評価・書類作成・締め切りからの脱却が大発明大発見に繋がる。
・一極集中ではなく、研究分野の裾野を広げるための資金援助
・ 過度な「選択と集中」をしないこと。新しい試みを奨励すること。
・ ImPACTのような大きすぎるプロジェクトはやめてほしい。

7

④続き

・光関連ベンチャーの支援。
・大学で開発された技術のベンチャー化支援
・ビジネススタートアップに憧れる文化の創出（ポスドクのキャリアパス）
・光分析機器や光学顕微鏡関連において日本は歴史的に世界を先導してきたが、スタート・アップは数も増加率も低く、企業からは斬新な製品は生まれてこない。この克服には、最先端光技術を持つ大学教員やポスドクが自ら起業することが望ましい。特にポスドクのスタートアップへの就職やポスドクの起業をエンカレッジする制度がほしい（産総研イノベーション・スクール）。

・研究者の時間を作る方策を考えてほしい。研究の前後の書類等の作業が多すぎ、出口となる就職先がないと学生が来ない。企業が儲かり、事業に積極的になることが必須。
・技官の適切な配置
・シニア研究者活用と研究環境サポート。
・少子化が進む中で、研究者、技術者の質的および量的確保
・学内外でのチーム化

・若手研究者のキャリアパスの充実。
・若手研究者に対する常勤研究職の確保
・博士研究員が分野を変えることを奨励すること。
・大学および大学院の進学、学費補助
・博士学位取得者の生活保障

・応用物理学会、日本光学会などに分散してしまった光学人材が協力し、古典から最先端まで統合的な戦略、研究が行えるしくみの構築。
・短期的な応用研究のみならず、基礎研究も重視したプロジェクト体制

8

図 6-4　事前アンケートの整理④

【総合討論での主な意見】

総合討論では、話題提供の発表と上記の事前アンケートの意見を踏まえ、以下の４つについて意見交換を行った。以下にそれぞれに対して主な意見を示し、最後に全体をまとめる。

(1)注目されている光科学技術、社会・産業上重要な分野、保持しておくべき基盤技術
(2)日本として強化していくべき分野
(3)光の分野で日本が世界に伍していくために必要な体制・仕組み
(4)光技術の俯瞰図

(1)注目されている光科学技術、社会・産業上重要な分野、保持しておくべき基盤技術

・地球環境問題解決のための光科学技術という観点、「光に基づく新エネルギー社会」の観点が抜けている。光を電気に変えるだけでなく、光を化学エネルギーに変える（光合成）ことや、大気汚染の検出など、地球環境問題解決のための様々な光の使い方がある。
・日本の中から世界に目を向ける（視点を変える）ことが必要である。深刻な伝染病、感染病、水の汚染、海洋の汚染、大気の汚染などへの対応が重要である。LiDAR についても、自動車用だけでなく、環境汚染に対する LiDAR の研究が重要である。紫外 LED についても、遺伝子を壊してバクテリアが増殖しないようにするのが重要なテーマであろう。水問題、地球温暖化の他にも、人口の爆発的増加の結果として起きる内乱、テロなどに対する安心・安全に対し、光でどう貢献するか考える必要がある。世界で何が危険で、何が困っていて、何が求められているかを考え、基礎科学、デバイス、装置といった側面で、様々な原理を生み出す形で貢献することが重要である。
・人と光のかかわり（視覚、感性）が重要である。オプティクスは見るというところから出てきた言葉であり、これらが盛り上がらないと光全体が盛り上がらない。
・オーグメンテッド・リアリティーやバーチャル・リアリティーのデバイスに、メタサーフェスの誘電体メタレンズや回折光学素子を投入する動きがアメリカを中心に盛んになっている。
・最も身近な照明は今でも進歩を続けており、エンターテインメントの視点が抜けている。天井に青空を再現するような人工的な青空の照明に注目しており、プロジェクションマッピング自体が照明的な効果を持っている。
・量子光学の関係が示されていない。重力波に関連した量子光学の話も出てきている。最近は光技術と量子との関連が深まっており、基礎科学の分野だけでなくセンシングとも関係があり重要なテーマである。
・光通信技術は飽和しておらず、技術的には伸びている。ビジネスとしては日本のプレーヤーが脱落して行き詰まり感があるが、産業上重要な分野である。
・レーザー加工は話題的には豊富である。レーザーや加工機で国内のものが少なく、産業的には外国に持っていかれている。
・レンズを磨ける技能者がいなくなっており、レンズやそれを使った物を作って産業に投入できる基盤技術が弱くなってきている。
・基礎科学で、何とかして限界を破るというところも重要である。例えば、近接場は回折限界を破ろうとして行った。ショットノイズ限界を破ろうとして量子技術が出てきている。量子にどう取り組むかもきちんと考えないといけない。量子はどの程度価値があるのか、物になるのか、産業界としては最先端の人たちに目利きをしてもらいたい。

(2)日本として強化していくべき分野

・世界に目を向けると、人口が爆発的に増加し、食料がなく、きれいな水もなく、プラスチックがあふれ返って困っている。世界の現場に行けば求められている新しい技術も見えてくる。
・社会への直接的なインパクトが大きいところには学生が魅力を感じてわくわくして入ってくる。ローマ時代は、ろうそくの光などを使った演出で、人を魅了していたという話もあり、光でインパクトのあることを見せることが重要である。
・光のアナログ性を活用したフォトニックアクセラレータという日本発の概念があり、例えば画像の前処理に特化したもので電子に対する光の優位性を出すリザーバーコンピューティングという話がある。また、ゴーストイメージングなど最近の AI 的なことも含めた光と情報処理の融合分野はやるべきことは多い。情報処理で手間がかかってしまうことがあれば、うまく融合して新しい技術がつくられていく可能性はある。
・イメージング、バイオイメージング、蛍光イメージングという観点からは、プローブ、蛍光色素、蛍光蛋白などでは日本は強く、すばらしい研究者が多くいるが、応用物理・光技術との融合、光る物からどのように情報を取得するかといったところは弱く、強化が望まれる。バイオロジーの人からも技術的な要求がある。また、アカデミックに、新しいアプローチ・やり方の研究があってもよい。
・エンターテインメントのつながりのある光技術も強化すべきである。
・機能性光材料は日本として強化していくべき基盤技術の一つである。
・光の機能材料に期待する側面として、環境の問題、プラスチックの問題、リサイクルの問題、希少物質の問題もある。これらに光は重要な役割を果たせる。
・応用を考えずに基礎研究を強化すべきである。技術が飽和するのは大いに結構で、ずっと成長していたら、新しいテーマに移れない。

(3) 光の分野で日本が世界に伍していくために必要な体制・仕組み

・国力を守るために、何をやるべきかという戦略性、集中も必要であり、システマティックに戦略を持った大きな柱には、資金的なメリハリをつけることが重要である。
・異分野間のつながり、連携をしやすい仕組みが必要である。世界トップの研究室になっていくためには、横の連携も深める必要がある。
・ナノテクプラットフォームの名古屋の分子物質合成の拠点では、無理やりに研究装置を医学部に持ち込むことで、医学部の先生が使いに来るようになっており、このような積極的なアプローチが必要である。
・若い人や分野の違う人が、オプティクスやフォトニクスの分野に入りやすくなるような仕組みができるとよい。ナノテクプラットフォームのような機能が光にも広がってくるとよい。

・日本の強いところは、物質・材料にある。足が地に着いて研究開発している。材料物性とのつながりで光も議論する場が欲しい。
・材料研究は日本の一番底力があるところなので、材料と光がうまく連携できることが大事なポイントだと思う。しかし、日本の光デバイス研究は材料に関しては非常に保守的である。海外では、デバイスの性能としてはかなり劣るものでも研究として活発に進めている。例えば、二次元物質のグラフェンやナノカーボンにおいては、日本は非常に強いが、海外の人たちが日本

の材料を使ってよい成果を出している。このような日本の強みを生かすところに学生を引きつけたい。
・新しい材料を入れるのを難しくしている一つの要因としては、他の研究室に入りにくい壁があることである。拠点で装置を共有するだけでも、その壁が下がってくる可能性があると思う。
・ナノ材料、ナノデバイス、ナノマテリアルとフォトニクスとの連携、光機能性材料といったものに対してテーマをつくって育てていかないといけない。
・バイオイメージングでも材料をつくれる人たちが様々な機能を出している。光ファイバー通信も材料づくりから始まったので、その精神を捨ててはいけない。
・化学の人材を光で活用することはこれから大変重要である。日本の企業の３分の１は化学であるため、材料をいじりながら光を扱う人たちは、キャリアパスという意味では大きなアドバンテージを持っている。ドクターの学生の付加価値を考えると、我々の研究室を卒業した学生の半分は化学の企業に行き、光を知らない企業の人たちに新しいテーマを提案できるといった付加価値がある。
・日本は物理と化学が分断されており、今後変わっていくことを期待する。
・光と物質の融合、物理と化学の融合を図りながら、次の展開が図れればすばらしい。

・先端の光技術の研究や大規模なシステムを作るためのファブ機能を持つ拠点も重要である。
・デジタル技術が発達し、ものづくり技術とデジタル技術を組み合わせてアイデアを実現しやすい環境になりつつあり、日本はこれを生かした拠点、仕組みを考える必要がある。
・日本はものづくりの加工技術として、レーザーに限らず様々なシーズを持っているが、それをまとめてプラットフォームにして世界に発信する力が必要である。

・企業の中に大学院大学というのをつくっている。研究所である程度の成果を出し、アプリケーション・装置化の段階になると、手を挙げれば大学院大学に行き、そこで幾らかの資金をもらってベンチャーの卵のようなものを立ち上げる制度がある。何がうまくいくのかわからないが、少なくともベンチャー精神を大事にしてアイデアのある人にやらせることが重要である。
・学生が行きたくなる会社が次々と出てくることが必要である。新たな会社が生まれて大きくなり、また消えていくようなダイナミックな流れが必要である。そのためには博士の人たちが頑張らないといけない。

・フォトニクス、光通信などは飽和感がある。光通信ではシャノン限界がほぼ達成されつつあり、量子雑音の原理限界に技術が限りなく近づいてきている。また、ムーアの法則が終わった後にどのようにしていけばよいのか難しくなってきているので、多様性や高リスクを容認し、裾野を広げることが重要である。
・光はいつ何に使えるのかということを常に求められている。キラーアプリを見つけることももちろん大事だが、国とし光の基礎研究をやるという強いメッセージを出すことも重要である。基礎研究は 10 年、15 年たてば、何かの応用先に結びつく。そもそも日本の光科学は強かったし、今でも強いものは残っているので、１つの応用にシュリンクさせないで、広い裾野として残していくことが必要である。
・基礎研究ができる体制の確保、研究に専念できる環境の整備も必要。

・海外とは若手研究者のスタートアップでかなり差がついており、日本でも自分の能力や興味・関心を生かした研究ができるようになると良い。

・大学のシーズと企業の間を取り持つコーディネーターがほとんどいない。レーザー加工はレーザーの一番基本的な応用であり、ものづくりの基盤技術だが、そこを見渡せる人が必要である。
・会社のシステムでは、例えば調査会社にこれはと思う人が目利き人材かどうか調べさせ、目利きとしての才能がある何人かピックアップした上で、ある人を選びやらせるということをしている。アカデミアと企業をつなぐところでも、同様なことができるとよい。
・海外をオーバービューした上で、こちらが伸びそうと旗を振る人をどのように育てるか検討していく必要がある。
・企業と大学との橋渡しをするコーディネーターが必要であるが、研究者同士をコーディネートしてくれる橋渡し役の人が必要である。
・研究者にはお金のない時期も重要である。あちこち駆けずり回ったり自分でつくることによって様々なことを学んだ。

・若い人のアイデアを拾える研究費の配分システムが必要であろう。また、シニアの研究者に若い研究者のコーディネーションをやってもらい、人的リソースのネットワークをつくることが重要である。このようなシニアに研究費を与えるようなシステムが必要である。
・研究は人によるのでその人をきちんと支援するシステムをつくらないといけない。一から立ち上げようとしている若い人の支援体制は必要である。

(4)光技術の俯瞰図
・波面制御、偏光制御という観点ではホログラムは復活しており、より重要性が高まっている。
・量子光学が俯瞰図のどこかに入るとよい。
・医療・バイオのところで今後重要になるエックス線、電磁波領域での新しい光源が入ってもよい。
・量子コヒーレンスを使ったダイヤモンド NV センター、冷却原子を使った重力場など様々な新しい領域が開けているが、それらをセンシングとしてどのように俯瞰図に載せるかを考える必要がある。
・社会に直接は関係していないかもしれないが、重力場や基礎学理への貢献といった軸があってもよい。

【まとめ】
(1)注目されている光科学技術、社会・産業上重要な分野、保持しておくべき基盤技術
・日本の中から世界に目を向けることが重要になっており、深刻な地球温暖化、伝染病、水汚染、海洋汚染、大気汚染などへの対応が必要
・人と光との関わりとしてディスプレイや照明、バーチャルリアリティなどエンターテイメントの視点などが重要
・AI／IoT の時代における光のアナログ性を活かしたコンピューティングへの応用、イメージ

ング技術、LiDAR 等のセンサ、メタサーフェスなどが注目
・量子光学、レーザー光源、レーザー加工、レンズなどの基盤技術の維持が必要

(2)日本として強化していくべき分野
・SDGs に関して世界の現場で求められる技術（社会のインパクトの大きな分野は学生も興味を持つ）
・光のアナログ性を活用したフォトニックアクセラレータによる情報処理技術の優位性の実証、各種イメージング技術による情報の取得技術、エンターテイメント関連光技術、機能性光材料
・特に、日本の強い材料と光技術との組合せは、環境問題・プラスチック問題などにも関連して戦略的な強化の検討が必要

(3)光の分野で日本が世界に伍していくために必要な体制・仕組み
・日本の持つレーザーなど様々なものづくりのシーズ技術とデジタル技術を組み合わせてアイデアを実現可能とする拠点・仕組みを検討し、これらをまとめてプラットフォームとして世界に発信することが重要
・材料分野や化学分野、医学分野など異分野と光技術の連携を促進するシステム、およびプラットフォームやファブ機能を有する研究拠点が必要
・若い人のアイデアを生かせるように、多様性や高リスクを容認し、裾野を広げる基礎研究ができる体制や環境の整備、および企業と大学間や研究者間を橋渡しするコーディネーターの充実が必要

(4)光技術の俯瞰図（図 6-5 は本ワークショップのコメントなどを反映した修正案）
・世界の視点から SDGs への貢献、重力場などの基礎学理への貢献を追加
・光の波面制御、偏光制御、量子光学、医療・バイオで重要となる X 線、電磁波領域での新たな光源、などの項目の追加

(5)今後の光技術発展への期待
・多様化する社会や顕在化する地球規模の課題をより強く意識し、より広い視点で分野融合・連携を進め、従来想定されないような応用も含めて光技術（光学・フォニクス技術）を活かす新しい方向性を見出すことが必要。
・光技術自体についても、硬直化することなく新しい概念や材料を積極的に取り入れる柔軟性が求められ、これらにより基礎科学の深化への貢献を期待。
・各研究領域で世界をリードする成果創出の環境提供に加え、俯瞰的で高い視点を有するビジョン創成人材が育つ風土の醸成により、長期的発展を期待。

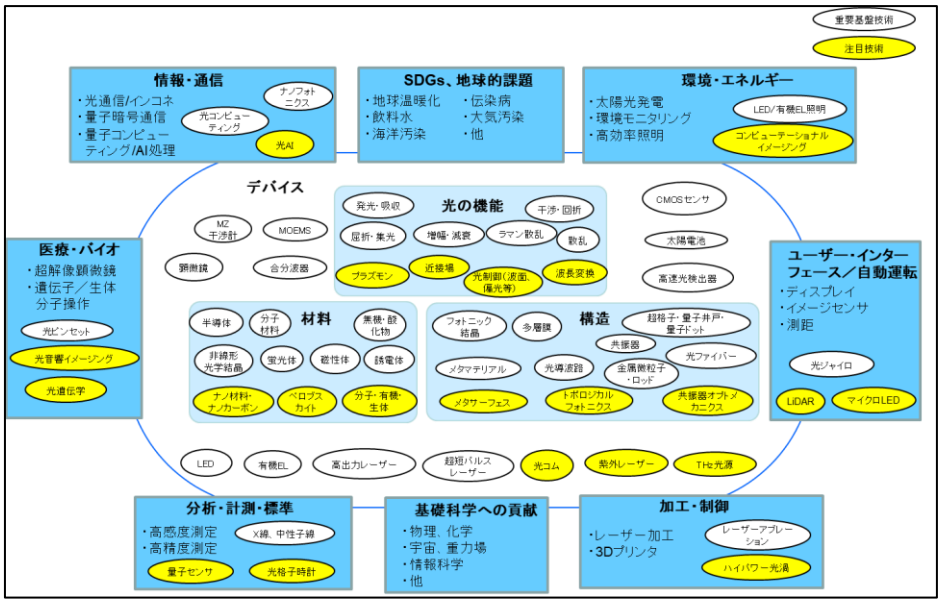

重要基盤技術
注目技術
情報・通信
・光通信/インコネ
・量子暗号通信
・量子コンピューティング/AI処理
ナノフォトニクス
光コンピューティング
光AI
SDGs、地球的課題
・地球温暖化
・飲料水
・海洋汚染
・伝染病
・大気汚染
・他
環境・エネルギー
・太陽光発電
・環境モニタリング
・高効率照明
LED/有機EL照明
コンピューテーショナルイメージング
デバイス
MZ干渉計
MOEMS
顕微鏡
合分波器
光の機能
発光・吸収
干渉・回折
屈折・集光
増幅・減衰
ラマン散乱
散乱
プラズモン
近接場
光制御(波面、偏光等)
波長変換
CMOSセンサ
太陽電池
高速光検出器
医療・バイオ
・超解像顕微鏡
・遺伝子／生体分子操作
光ピンセット
光音響イメージング
光遺伝学
材料
半導体
分子材料
無機・酸化物
非線形光学結晶
蛍光体
磁性体
誘電体
ナノ材料・ナノカーボン
ペロブスカイト
分子・有機・生体
構造
フォトニック結晶
多層膜
超格子・量子井戸・量子ドット
共振器
光ファイバー
メタマテリアル
光導波路
金属微粒子・ロッド
メタサーフェス
トポロジカルフォトニクス
共振器オプトメカニクス
ユーザー・インターフェース／自動運転
・ディスプレイ
・イメージセンサ
・測距
光ジャイロ
LiDAR
マイクロLED
LED
有機EL
高出力レーザー
超短パルスレーザー
光コム
紫外レーザー
THz光源
分析・計測・標準
・高感度測定
・高精度測定
X線、中性子線
量子センサ
光格子時計
基礎科学への貢献
・物理、化学
・宇宙、重力場
・情報科学
・他
加工・制御
・レーザー加工
・3Dプリンタ
レーザーアブレーション
ハイパワー光渦

図 6-5　俯瞰図の修正案

付録

付録１：開催趣旨・プログラム

開催趣旨

ナノテクノロジー・材料分野は物理学、化学、生物学を横断し、原子分子レベルでの観測や構造形成・機能発現などを通して、物質科学や材料技術、デバイス技術などを進展させ、さらには異分野の融合を促進しつつ進化する技術分野です。CRDS では今春、ナノテクノロジー・材料分野における世界各国の国家計画、投資戦略、研究ポテンシャル、技術進化、産業動向、重要な研究開発領域を含む俯瞰報告書（CRDS-FY2018-FR-03）を発行しました。この俯瞰報告書は、CRDS が政策立案コミュニティおよび研究開発コミュニティとの継続的な対話を通じて把握した研究開発の大きな流れを、研究開発戦略立案の基礎資料とすることを目的として、CRDS の視点からまとめたものになります。各分野における研究開発の方向性や主要な研究開発領域、さらに国際的なわが国のポジションを把握するのに役立つものとして、また、複数分野にまたがる新しい切り口からの研究開発戦略を立案することにも役立つことを期待しています。当該分野の動向を深く知りたいと考える政策決定者、行政官、企業人、大学・独法関係者、また、研究者にとっても、自身の専門分野を超えた範囲の状況を知る上で有益な資料となることを期待しています。

既発行済のナノテクノロジー・材料分野の俯瞰報告書では、32 の重要領域について研究開発状況や国際比較を取り纏めていますが、さらなる調査・検討が必要な領域や、基盤的な技術のために複数の領域に分かれた記述となり、その領域全体について今後国としてどうすべきか、まだ十分に把握・検討できていないものもあります。このため、今年度から来年度にかけて、前回の俯瞰報告書で欠けていた部分、研究動向の変化・進展のきざしなどから新たに加えるべき部分などを考慮して、光技術、プロセス・インフォマティクスの２つの領域を調査しワークショップを開催することを計画しています。

その第一回目として、光技術領域を取り上げます。光の技術は光通信、自動運転、ディスプレイ、イメージセンサ、LED 照明、太陽電池、レーザー加工、計測・評価装置などの民生用製品や産業用製品に広く使われ、情報処理・通信分野、エネルギー分野だけでなくバイオ・医療の分野への利用も進んできています。今後は、各技術の高度化はもとより、異分野の技術との融合・統合により新たな技術領域や応用分野を作り出したりしていくことが期待されます。

一方、エレクトロニクス、通信機器、計測装置など以前は日本が先端技術を保有し競争力が強かった産業分野において、最近は産業競争力が低下しています。また、今後の成長が見込まれるバイオ・医療などの新領域や、光技術の基盤となるレーザーや検出器などの技術でも、海外の装置に席巻される状況になってきています。

このような状況を踏まえ、今後の大きな発展が期待され注目される光技術、世界との比較において日本が強化していくべき技術・応用領域、異分野融合や人材育成も含めた光技術の強化に必要な視点・考え方、それを強力に推進できる研究体制、などについて議論を深める目的で、ワークショップを開催します。

なお、本ワークショップは非公開（クローズド）とし、議論の内容は俯瞰ワークショップ報告書として纏め、CRDS の web サイト上で一般公開するとともに、俯瞰報告書ナノテクノロジー・材料分野（2021 年版）への反映や今後の提言書作成の参考に致します。

プログラム

（敬称略）

開催日時：2019 年 12 月 23 日（月）10:00～18:00
開催会場：AP 市ヶ谷　8A ルーム

司会：馬場　寿夫（JST-CRDS）

10:00～10:05　開会挨拶　曽根　純一（JST-CRDS）
10:05～10:25　ワークショップの趣旨説明　馬場　寿夫（JST-CRDS）

10:25～10:55　光技術の最新動向（光産業技術振興協会報告書より）
中野　義昭（東京大学）

10:55～11:45　（話題提供１）コンピューティング技術
10:55～11:20　リザーバコンピューティングと意思決定への応用
内田　淳史（埼玉大学）
11:20～11:45　ポストムーアとフォトニクス　並木　周　（AIST）
11:45～12:10　コンピューティング技術を活用した光デバイス設計と展望
橋本　俊和（NTT 先端集積デバイス研）

13:00～14:15　（話題提供２）イメージング・計測技術
13:00～13:25　Si フォトニクスによるソリッドステートライダー開発
馬場　俊彦（横浜国立大学）
13:25～13:50　光の波面・偏光分布制御と光イメージング　小澤　祐市（東北大学）
13:50～14:15　バイオイメージングとレーザー光源への期待　小関　泰之（東京大学）

14:25～16:25　（話題提供３）次世代光学素子／新たな光基盤技術
14:25～14:50　集積ナノフォトニクス技術の新しい展開　納富　雅也（東京工業大学）
14:50～15:15　メタマテリアル／メタサーフェスの現状と展望
高原　淳一（大阪大学）
15:15～15:40　量子カスケードデバイスの進展　枝村　忠孝（浜松ホトニクス）
15:40～16:05　光コムの進展と分光応用　岩國　加奈（電気通信大学）

16:15～17:55　総合討論　ファシリテーター：岩本　敏（東京大学、JST-CRDS）
論点
１．日本として強化すべき光技術（戦略的な視点、日本の強みを活かす、など）
２．必要な研究体制
３．基盤技術の強化策
４．俯瞰図の更新

17:55～18:00　閉会挨拶　曽根　純一（JST-CRDS）

付録２：参加者一覧

（敬称略）

招聘者

（話題提供者）

・中野　義昭　　東京大学大学院工学系研究科　教授、光技術動向調査委員会　議長
・内田　淳史　　埼玉大学 数理電子情報部門　教授
・並木　周　　産業技術総合研究所　電子光技術研究部門　副研究部門長
・橋本　俊和　　ＮＴＴ先端集積デバイス研究所　主幹研究員
・馬場　俊彦　　横浜国立大学大学院工学研究院　教授
・小澤　祐市　　東北大学多元物質科学研究所　准教授
・小関　泰之　　東京大学大学院工学系研究科　准教授
・納富　雅也　　東京工業大学理学院　教授、NTT 物性科学基礎研究所
　　上席特別研究員
・高原　淳一　　大阪大学大学院工学研究科　教授
・枝村　忠孝　　浜松ホトニクス　中央研究所材料研究室　副研究室長
・岩國　加奈　　電気通信大学　レーザー新世代研究センター　助教

（コメンテータ）

・尾松　孝茂　　千葉大学大学院工学研究院　教授
・河田　聡　　大阪大学　名誉教授
・納谷　昌之　　富士フイルム（株）R&D 統括本部　解析技術センター　研究主幹

JST-CRDS ナノテクノロジー材料ユニット

・曽根　純一　　上席フェロー
・宮下　哲　　フェロー・ユニットリーダー
・荒岡　礼　　フェロー
・眞子　隆志　　フェロー
・河村　誠一郎　フェロー
・永野　智己　　総括ユニットリーダー・JST 研究監
・馬場　寿夫　　フェロー
・八巻　徹也　　フェロー
・伊藤　聡　　特任フェロー、物質・材料研究機構　MI2I 拠点長
・川合　知二　　特任フェロー、大阪大学産業科学研究所　特任教授
・佐藤　勝昭　　特任フェロー、東京農工大学　名誉教授
・岩本　敏　　特任フェロー、東京大学生産技術研究所　教授
・本間　格　　特任フェロー、東北大学多元物質科学研究所　教授

関係府省・機関等

・菅野　普　　内閣府（政策統括官（科学技術・イノベーション担当）付）
　　上席政策調査員

・片山　郁文　　文部科学省　研究振興局　参事官（ナノテクノロジー・物質・材料担当）付　学術調査官
・梶川　健一　　経済産業省　産業技術環境局　研究開発課　未来開拓研究統括戦略官
・川島　祐希　　経済産業省　産業技術環境局　研究開発課　係長
・河野　研　　経済産業省　産業技術環境局　研究開発課　産業技術プロジェクト推進室　室長補佐
・竹井　裕介　　経済産業省　産業技術環境局　研究開発課　産業技術プロジェクト推進室　研究開発専門職
・松井　淳　　経済産業省　産業技術環境局　研究開発課　産業技術プロジェクト推進室　研究開発専門職
・林　秀樹　　新エネルギー・産業技術総合開発機構　技術戦略研究センター　フェロー
・福田　浩章　　新エネルギー・産業技術総合開発機構　技術戦略研究センター　研究員
・秦野　歳久　　量子科学技術研究開発機構　量子ビーム科学部門　研究企画部　研究統括
・越智　義浩　　量子科学技術研究開発機構　量子ビーム科学部門　研究企画部　研究統括

JST
・村川　克二　　研究開発戦略センター　フェロー
・玉川　恭久　　未来創造研究開発推進部　主任調査員
・高橋　邦明　　戦略研究推進部　副調査役
・三須　幸一郎　戦略研究推進部　主任調査員
・土屋　朋信　　戦略研究推進部　主任調査員
・上田　幸弘　　戦略研究推進部　主任調査員
・落合　幸徳　　イノベーション拠点推進部　推進 PO
・安藤　朗　　イノベーション拠点推進部　主任調査員
・山中　英生　　イノベーション拠点推進部　主任調査員

■ワークショップ企画・報告書編纂メンバー■

曽根　純一	上席フェロー
宮下　哲	フェロー／ユニットリーダー
馬場　寿夫	フェロー
荒岡　礼	フェロー
河村　誠一郎	フェロー／エキスパート
永野　智己	総括ユニットリーダー・JST 研究監
眞子　隆志	フェロー
八巻　徹也	フェロー
伊藤　聡	特任フェロー
岩本　敏	特任フェロー
川合　知二	特任フェロー
佐藤　勝昭	特任フェロー
清水　敏美	特任フェロー
田中　一宜	特任フェロー
玉野井　冬彦	特任フェロー
本間　格	特任フェロー
村井　眞二	特任フェロー

※お問い合わせなどは下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2019-WR-06

俯瞰ワークショップ報告書

ナノテクノロジー・材料分野　区分別分科会

「光技術の俯瞰　～光技術の注目動向と日本の技術力強化の方向性～」

令和 2 年 3 月　March 2020

ISBN 978-4-88890-669-2

国立研究開発法人科学技術振興機構　研究開発戦略センター
ナノテクノロジー・材料ユニット
Nanotechnology/Materials Unit,
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076　東京都千代田区五番町 7　K's 五番町
電　話　03-5214-7481
E-mail　crds@jst.go.jp
https://www.jst.go.jp/crds/

©2020 JST/CRDS

許可無く複写／複製をすることを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.
Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ISBN 978-4-88890-669-2